



**Paulo André
Martins de Pinho**

**Valorização de Resíduos em Materiais
de Construção**



**Paulo André
Martins de Pinho**

Valorização de Resíduos em Materiais de Construção

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizado sob a orientação científica do Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira, professor associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto “(Bias-to-soil) Cinzas de biomassa: Características em relação à sua origem, tratamento e aplicação no solo” PTDC/AAC-AMB/098112/2008 - FCOMP-01-0124-FEDER-008487, financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade – COMPETE e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

o júri

presidente

Professora Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa
Professora Associada do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Luís António da Cruz Tarelho
Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira
Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

agradecimentos

No final desta fase, não poderia deixar de expressar o meu profundo agradecimento a todos os que me ajudaram a atingir este objetivo pessoal. Graças a vocês esta etapa foi mais do que um crescimento académico, foi também, e acima de tudo, um crescimento humano.

Ao Professor Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira agradeço a orientação, disponibilidade e motivação, expressando ainda a minha gratidão pelo apoio e tempo despendido para que a concretização deste trabalho fosse possível.

À Regina Modolo por todo o auxílio prestado, sempre com disponibilidade, paciência e dedicação, enfim por todas as suas qualidades profissionais e humanas que permanecerão carinhosamente na minha memória.

Aos Técnicos do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, pelo apoio e dedicação e excelente profissionalismo prestados durante a execução dos trabalhos laboratoriais.

A todos os meus colegas e amigos da Universidade de Aveiro, em especial ao Flávio Arrais, Carla Silva, Daniel Pedrosa e Rita Neves, pelo companheirismo que, ao longo destes anos, fizeram com que o meu percurso académico não fosse só uma procura por conhecimento, mas também um caminho onde se constroem amizades.

Aos meus amigos de Vale de Cambra que, conhecendo-me desde sempre, partilharam comigo as dificuldades e sucessos deste trabalho, dando-me alento para finalizar esta etapa.

A ti, Sandra, por estares sempre ao meu lado e partilhares comigo todas as dificuldades e alegrias. Com o teu carinho, amizade e amor, qualquer percurso torna-se mais fácil.

Por último, mas não menos importante, à minha família. Por terem acreditado em mim, e por permitirem que este sonho se tenha tornado realidade. É com imensa gratidão que reconheço todos os sacrifícios que fizeram para que nada me faltasse, e sobretudo, pela educação que me deram e que construiu a pessoa que sou hoje. Sem vocês, nada disto era possível.

Muito Obrigado!

palavras-chave

Resíduos, valorização, materiais, construção civil, cinzas de fundo, cinzas volantes, pavimentos rodoviários.

resumo

O trabalho desenvolvido nesta dissertação enquadra-se no objetivo geral de valorização de resíduos provenientes de unidades de pasta Kraft de eucalipto, nomeadamente cinzas de fundo e cinzas volantes das fornalhas de biomassa.

Atualmente uma das mais graves preocupações das sociedades dos países desenvolvidos passa por encontrar um destino adequado para resíduos gerados. A construção civil, aliada com a indústria da produção de pasta e papel que por ano gera milhares de toneladas de resíduos sólidos processuais, pode criar canais de escoamento para os mesmos.

O principal objetivo desta dissertação passa por verificar a viabilidade da aplicação de cinzas de fundo e cinzas volantes nas fundações de pavimentos rodoviários, avaliando compatibilidades físicas, mineralógicas e o seu desempenho mecânico.

Focalizando o objetivo deste estudo analisaram-se dois tipos de soluções. A primeira solução passou pela criação de misturas de solo e resíduos revolvendo-se o material para este funcionar com um só. A segunda implicou a deposição superficial de resíduos sobre o solo. Para avaliar a viabilidade das soluções realizou-se uma campanha de ensaios laboratoriais, uma experiência de campo e ainda uma simulação laboratorial.

Foi possível verificar que a adição simultânea de cinzas de fundo e cinzas volantes é uma alternativa interessante de valorização destes resíduos na fundação de pavimentos rodoviários.

keywords

Wastes, valorisation, material and civil construction, bottom ash, fly ash, road pavements.

abstract

The work developed in this dissertation is consistent with the general aim of valorisation of wastes coming from eucalyptus Kraft pulp units, namely bottom ash and fly ash from biomass furnaces.

One of the biggest challenges facing societies in developed countries today is to find an adequate destination for generated residues. The civil construction industry, along with the pulp and paper production industry, which generates thousands of tons of solid waste every year, can develop adequate solid waste disposal strategies.

The main purpose of the current dissertation is to investigate the viability of using bottom ash and fly ash in road pavements, analyzing its physical and mineralogical compatibility, as well as its mechanical performance.

Considering the purpose of this study, two types of solutions were thus analysed. The first solution involved the creation of soil and residue mixtures, in which the material was revolved to form a single compost. The second solution consisted of superficially placing residues on soil. To evaluate the viability of both solutions, laboratory tests were conducted, including a field trial, and a laboratory-based simulation.

It was verified that the simultaneous addition of bottom ash and fly ash is an interesting alternative for valuing these residues in the foundation of road pavements.

ÍNDICE

ÍNDICE	i
Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	ix
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos.....	1
1.3 Organização da Dissertação	2
2 Gestão Ambiental e Valorização de Resíduos.....	7
2.1 O Setor da Pasta e do Papel	9
2.1.1 Processo de produção da pasta de papel.....	9
2.1.2 Combustão de biomassa florestal e resíduos sólidos gerados	13
2.2 Resíduos Sólidos Processuais e Estudos de Valorização.....	14
2.2.1 Resíduos orgânicos	16
2.2.1.1 Lamas primárias	16
2.2.1.2 Lamas secundárias (biológicas)	17
2.2.2 Resíduos inorgânicos	18
2.2.2.1 Dregs e grits	18
2.2.2.2 Cinzas de fundo	19
2.2.2.3 Cinzas volantes.....	21
2.2.2.4 Lamas de carbonato.....	22
2.3 Pavimentos Rodoviários	23
3 Procedimento Experimental.....	29
3.1 Descrição Geral.....	29

3.2	Metodologia Experimental	31
3.2.1	Recolha dos materiais utilizados	33
3.2.2	Caracterização geral	34
3.2.2.1	Teor de humidade	34
3.2.2.2	Análise granulométrica	35
3.2.2.3	Grau de impurezas	37
3.2.2.4	Limites de Atterberg	40
3.2.2.5	Proctor	42
3.2.2.6	CBR	43
3.2.2.7	Massa volúmica aparente	44
3.2.2.8	Análise mineralógica	45
3.2.2.9	Análise química	46
3.2.2.10	Análise do comportamento térmico dos resíduos	47
3.2.2.11	Quantificação de cloretos	47
3.2.3	Ensaio de campo	48
3.2.4	Simulação laboratorial	50
3.2.4.1	Molhagem dos recipientes	53
3.2.4.2	Ensaio à penetração	53
3.2.4.3	Desmontagem dos recipientes e recolha de amostras.	55
3.2.4.4	Esclerometro	56
3.2.4.5	Resistência à flexão	56
3.2.4.6	Resistência à compressão	57
3.2.4.7	Avaliação do módulo de elasticidade pelo PUNDIT (ultra-sons)	58
3.2.4.8	Massa específica	59
3.2.4.9	Absorção de água	60

3.2.4.10	Porosidade aberta	60
4	Discussão de Resultados	65
4.1	Caracterização Geral	65
4.1.1	Caracterização física.....	65
4.1.2	Caracterização química e mineralógica.....	77
4.1.3	Caracterização mecânica	85
4.2	Ensaio de Campo	89
4.3	Simulação Laboratorial.....	89
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	101
6	Referências Bibliográficas	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Prioridades nos processos de gestão de resíduos sólidos (Modolo, 2006)	8
Figura 2.2 - Diagrama geral do processo de produção Kraft (Martins, 2007).	10
Figura 2.3 - Produção de Resíduos Sólidos (CELPA, 2012a).....	12
Figura 2.4 - Destino dos resíduos sólidos produzidos pela indústria papelreira (CELPA, 2012a)	12
Figura 2.5 - Central Termoelétrica de Mortágua (Mortágua, 2007).....	13
Figura 2.6 - Principais tecnologias de combustão de biomassa (Loo e Koppejan, 2008)..	14
Figura 2.7 - Tipos de resíduos resultantes do processo Kraft e respetivas fases (Portucel/Soporcel, 2012).....	15
Figura 2.8 - Diagrama do processo de tratamento de efluentes líquidos (Pinto, 2005)	16
Figura 3.1 - Escavação e perfil do solo virgem	34
Figura 3.2 - Amostras após peneiração a seco (cinzas de fundo).....	36
Figura 3.3 - Série de peneiros utilizada na mesa de agitação	36
Figura 3.4 - Ensaio do Equivalente de Areia.....	37
Figura 3.5 - Determinação do Equivalente de Areia	38
Figura 3.6 - Ensaio Azul-de-Metileno.....	39
Figura 3.7 - Mancha azul-de-metileno da amostra de cinzas volantes.....	39
Figura 3.8 - Ensaio LL (Fall cone test)	42
Figura 3.9 - Ensaio Proctor com compactação pesada em molde grande	43
Figura 3.10 - Ensaio CBR	44
Figura 3.11 - Determinação da massa volúmica pelo método do picnómetro a) – representação do M1, b) – representação do M3, c) – representação do M2, d) – representação do M4.....	45
Figura 3.12 - Obtenção das amostras para determinação de fases cristalinas	46

Figura 3.13 - Amostras para análise química	47
Figura 3.14 - Ensaio de quantificação de cloretos – Amostras antes e durante a filtragem	48
Figura 3.15 - Ensaio de quantificação de cloretos - pipetagem e equipamento utilizado ..	48
Figura 3.16 - Divisão do terreno (experiência de campo)	49
Figura 3.17 - a) – Cinzas de fundo utilizadas; b) – Remoção da camada de tout-venant; c) – Aplicação do resíduo; d) – Espalhamento e alisamento da camada de cinzas; e) – Vista do terreno 4 e 3 (da esquerda para a direita); f) - Vista do terreno 1.....	50
Figura 3.18 - Montagem das caixas para a simulação.....	52
Figura 3.19 - Pormenor do furo e recuperação da água de lavagem da simulação (Recipiente, tabuleiro e solução de recolha de água – da esquerda para a direita)	52
Figura 3.20 - Molhagem do recipiente nº3	53
Figura 3.21 - Ensaio à penetração (recipiente 3).....	54
Figura 3.22 - a) – Remoção do recipiente de plástico; b) – Amostra sem recipiente; c) – Alisamento da superfície de contacto resíduo-solo; d) – Amostra final, antes de ser levada a corte para recolha das amostras a ensaiar.	55
Figura 3.23 - Exemplo de amostras recolhidas do recipiente 2.....	56
Figura 3.24 - Ensaio Esclerometro	56
Figura 3.25 - Ensaio de resistência à flexão (SHIMADZU: AG-IC 100kN)	57
Figura 3.26 - Ensaio de resistência à compressão (SHIMADZU: AG-IC 100 kN)	57
Figura 3.27 - Ensaio de ultra-sons com o aparelho PUNDIT	58
Figura 4.1 - Distribuição granulométrica da amostra REF	66
Figura 4.2 - Distribuição granulométrica da amostra SBA	66
Figura 4.3 - Distribuição granulométrica da amostra SF	67
Figura 4.4 - Distribuição granulométrica da amostra CF.....	69
Figura 4.5 - Distribuição granulométrica da amostra CV	69
Figura 4.6 - Distribuição granulométrica da amostra CH	70

Figura 4.7 - Distribuição granulométrica da amostra M1	71
Figura 4.8 - Distribuição granulométrica da amostra M2	71
Figura 4.9 - Distribuição granulométrica da amostra M3	72
Figura 4.10 - Reta de resultados do ensaio Limite de Liquidez	74
Figura 4.11 - Difrátograma de raios X do solo de fundação (Q = Quartzo (SiO_2), A = Albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), M = Muscovite-1M ($\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$)).	78
Figura 4.12 - Difrátograma de raios X das cinzas de fundo (Q = Quartzo (SiO_2), K = Microclina (KAlSi_3O_8), A = Albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)).	79
Figura 4.13 - Difrátograma de raios X das cinzas volantes (Q = Quartzo (SiO_2), C = Calcite (CaCO_3), Su = Sulfato de Cálcio ($\text{Ca}(\text{SO}_4)$), Sy = Sylvite (KCl)).	80
Figura 4.14 - Difrátograma de raios X da M1 (Q = Quartzo (SiO_2), Microclina (KAlSi_3O_8), Calcite (CaCO_3), Sylvite (KCl), Sulfato de Cálcio ($\text{Ca}(\text{SO}_4)$) e Kalicinite ($\text{K}(\text{HCO}_3)$)	80
Figura 4.15 - Difrátograma de raios X da M2 (Abreviaturas: Q = Quartzo (SiO_2), C = Calcite (CaCO_3), K = Microclina (KAlSi_3O_8)).	81
Figura 4.16 - Difrátograma de raios X da M3 (Abreviaturas: Q = Quartzo (SiO_2), C = Calcite (CaCO_3), K = Microclina (KAlSi_3O_8), M = Muscovite-2M2 ($(\text{K},\text{Na})\text{Al}_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)	81
Figura 4.17 - Análise térmica das Cinzas Volantes.....	84
Figura 4.18 – Análise térmica das Cinzas de Fundo (Modolo et al., 2014)	84
Figura 4.19 - Curvas de resultados do ensaio Proctor (Abreviaturas: SF = Solo de Fundação, REF = Referência, SBA = Solo “bottom ashes”, M1 = Mistura 1, M2 = Mistura 2, M3 = Mistura 3).....	85
Figura 4.20 - Curvas de resultados do ensaio CBR (Abreviaturas: REF = Referência, SBA = Solo “Bottom Ashes”, SF = Solo de Fundação, M1 = Mistura 1, M2 = Mistura 2, M3 = Mistura 3)	87
Figura 4.21 - Pouca consistência das cinzas de fundo na experiência de campo	89

Figura 4.22 - Recipientes antes da molhagem (recipiente 1, 2 e 3 - da esquerda para a direita).....	91
Figura 4.23 - Recipientes depois da molhagem (recipiente 1, 2 e 3 - da esquerda para a direita).....	92
Figura 4.24 – Ensaio de penetração nos recipientes; figura a) e b) relativas ao recipiente 1, figura c) relativa ao recipiente 2 e restantes relativas ao recipiente 3	93
Figura 4.25 - a) – Amostra do recipiente 2; b) – Amostra do recipiente 3; c) – Amostra do recipiente 1.	94
Figura 4.26 - Esquema de recolha de amostras do recipiente 2 (à esquerda observa-se a amostra total, à direita o esquema de amostras recolhidas a partir da zona B3).	94
Figura 4.27 - Esquema de recolha de amostras do recipiente 3 (à esquerda observa-se a amostra total, à direita o esquema de amostras recolhidas a partir da zona C3).	95

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Percentagens dos componentes utilizados nas misturas – Caracterização geral	30
Tabela 3.2 - Percentagem dos componentes utilizados nas misturas – Simulação laboratorial.....	31
Tabela 3.3 - Ensaio realizados	32
Tabela 3.4 - Significado do VBS para solos (Branco et al., 2008).....	40
Tabela 3.5 - Classificação de Atterberg baseado no comportamento “plástico” dos solos	41
Tabela 3.6 – Significado do índice de liquidez	41
Tabela 3.7 - Constituição dos recipientes (simulação)	51
Tabela 4.1 - Valores do Teor de Humidade.....	65
Tabela 4.2 - Valores dos Limites de Atterberg (Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Índice de Plasticidade).....	73
Tabela 4.3 - Valores do Índice de Liquidez (IL)	74
Tabela 4.4 - Resultados do ensaio da Massa Volúmica.....	75
Tabela 4.5 - Resultados do Equivalente de Areia.....	75
Tabela 4.6 - Valores do parâmetro valor de Azul-de-metileno	76
Tabela 4.7 - Composição química elemental das amostras CF, CV e SF	82
Tabela 4.8 - Valores do ensaio de quantificação de cloretos.....	82
Tabela 4.9 - Resultados do ensaio CBR em percentagem	88
Tabela 4.10 - Esquema da segunda molhagem dos recipientes.....	90
Tabela 4.11 - Resultados do ensaio à penetração nos recipientes	92
Tabela 4.12 - Valores de resistência à compressão, flexão e módulo de elasticidade dinâmico	95
Tabela 4.13 - Valores médios dos ensaios da simulação laboratorial.	96

CAPÍTULO 1

Introdução

Enquadramento

Objetivos

Organização da Dissertação

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Atualmente, um dos desafios da sociedade contemporânea passa por querer atingir um patamar de gestão sustentável de recursos naturais que o nosso planeta pode oferecer. Para tal é necessário ter conhecimentos e desenvolver estratégias para uma melhor gestão ambiental, principalmente pelas grandes indústrias que por ano geram milhares de toneladas de resíduos sólidos processuais. Torna-se então importante, no contexto da gestão de resíduos, realizar estudos para a valorização dos mesmos, prevenindo assim fins menos nobres, como o depósito em aterro. Desta forma, a área da construção civil oferece uma excelente possibilidade para valorizar tais resíduos, daí a importância de focalizar as investigações e os meios para permitir que esta indústria seja propícia ao escoamento destes materiais.

Nesta dissertação será aprofundada a questão da valorização de resíduos da indústria da pasta e do papel no sector da construção, mais precisamente na aplicação desses mesmos resíduos em pavimentos rodoviários. Com esta finalidade, o tema é contextualizado inicialmente com informações acerca da gestão ambiental e valorização de resíduos, avançando para a indústria de pasta de papel, percebendo o processo de fabrico e os resíduos gerados, assim como estudos de valorização dos mesmos. Finalmente todo este enquadramento é encerrado com informação na área dos pavimentos rodoviários e conhecimento de meios para escoar resíduos precisamente nesta área da construção.

Como os resíduos a utilizar são gerados em Central Termoelétrica de Biomassa (CTB), neste trabalho é destacada alguma informação relativa a este tipo específico de central, assim como informações relevantes sobre o seu funcionamento e consequentes resíduos gerados.

1.2 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é avaliar a possibilidade da aplicação de resíduos na fundação de pavimentos rodoviários. Os resíduos alvo de valorização são cinzas de fundo e cinzas volantes, provenientes da queima de biomassa.

Com o desenvolvimento deste estudo, são conhecidas as propriedades físicas, químicas, mecânicas e composicionais do solo e resíduos utilizados. Posteriormente estas propriedades são comparadas com a mistura dos dois componentes (solo+resíduo), verificando as alterações que ocorreram nos três diferentes níveis referidos. São testadas as misturas para averiguar se, na sua aplicação, não diminui a qualidade das obras onde serão aplicadas e se causam, ou não, a degradação do meio ambiente.

É também estudada a aplicação de misturas de resíduos à superfície de um solo natural, sendo criado um ambiente de simulação, em diferentes recipientes, utilizando-se várias misturas, uma delas representativa de uma experiência de campo que também será realizada em paralelo, permitindo desta forma, um tipo de valorização que não envolve revolver o solo com os aditivos, mas aplicando-os diretamente sobre o solo.

Caso se verifique a viabilidade do processo com este estudo, cria-se um canal de escoamento para milhares de toneladas de resíduos produzidos por ano, reduzindo a quantidade de resíduos com fins menos nobres económica e ambientalmente.

1.3 Organização da Dissertação

Com base nos objetivos estipulados no ponto anterior desta tese, foi efetuada uma abordagem teórica, de forma a compreender melhor o tema e os seus objetivos associados. O Capítulo 2 deste estudo, intitulado por “Gestão Ambiental e Valorização de Resíduos”, é abordada a problemática social da gestão de resíduos. Impelindo a sensibilização ambiental e conhecimentos sobre esta temática, forma-se naturalmente um estímulo para motivar estudos que comprovem a possibilidade, em termos práticos, de valorizar resíduos considerados nocivos para o meio ambiente quando adotados determinados destinos para os mesmos, tais como o aterro. Num subcapítulo, cujo título é “O Setor da Pasta e do Papel”, aborda-se toda a informação pertinente sobre esta indústria, desde o seu valor económico nacional, assim como o processo de produção de pasta de papel, passando pelos tipos de combustão de biomassa florestal que se utilizam atualmente, destacando também os resíduos gerados com essa queima. O subcapítulo “Resíduos Sólidos Processuais e Estudos de Valorização” destaca alguns dos resíduos gerados no processo de fabrico de pasta de papel, onde se encontra descrita a sua origem, seguido da apresentação de estudos que visam a criação de formas de escoamento, com o objetivo de valorizar os resíduos

sólidos processuais. Finalmente no subcapítulo “Pavimentos Rodoviários” é abordado o impacto ambiental que este tipo de obras acarreta e ainda um enquadramento teórico sobre os pavimentos, sendo explicado como são constituídos, dando maior importância à fundação dos pavimentos rodoviários, sendo esta parte dos pavimentos a de maior relevância para o estudo.

No Capítulo 3 apresenta-se o “Procedimento Experimental”, usado para atingir os objetivos deste estudo. Neste capítulo incluiu-se a descrição do procedimento experimental, assim com uma breve explicação de todos os ensaios realizados, juntamente com os fins que se pretendem com a realização dos mesmos. No capítulo 4 “Análise e discussão de resultados” são apresentados os dados relevantes de cada ensaio, e feitos comentários acerca desses mesmos resultados, de maneira a que seja perceptível o seu significado e importância para o estudo. No Capítulo 5 “Conclusões” são apresentadas as conclusões do estudo efetuado e avaliada a viabilidade das diferentes soluções apresentadas, ainda são apresentados desenvolvimentos futuros que visam incentivar a realização de estudos nesta área.

CAPÍTULO 2

Gestão Ambiental e Valorização de Resíduos

O Setor da Pasta e do Papel
Resíduos Sólidos Processuais e Estudos de Valorização
Pavimentos Rodoviários

2 GESTÃO AMBIENTAL E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS

De maneira a existir um maior entendimento do trabalho efetuado é necessária a inclusão de informações acerca da gestão ambiental e valorização de resíduos. Percebendo o ponto de situação nesta área, no contexto social e de investigação, é então possível criar estratégias para atingir o objetivo principal desta tese: a valorização de dois resíduos (cinzas de fundo e cinzas volantes) de maneira a que a sua aplicação, em pavimentos rodoviários, não seja prejudicial a nível social, ambiental e sem redução de qualidade das obras.

Numa sociedade em que o “gasto” é maior que o “ganho” torna-se cada vez mais importante uma utilização racional dos recursos naturais. O Homem é de facto o principal agente transformador, em benefício do seu desenvolvimento, acarretando como consequência a degradação do planeta (Virtuoso, 2004).

Em termos históricos, a atividade antropológica tem alterado significativamente as paisagens naturais de maneira a garantir recursos necessários à sua sobrevivência, deixando uma “pegada ecológica” cada vez mais gravosa, sobretudo na escala temporal após a revolução industrial. Os processos produtivos, sendo favorecidos pela tecnologia, necessitam de mais matérias-primas e consequentemente, geram uma maior quantidade de resíduos (Silva, 2009).

Um dos maiores desafios da sociedade atual é o de obter uma racionalização dos recursos naturais, de forma consciente e comprometida com a responsabilidade ambiental. A valorização dos resíduos torna-se então uma alternativa de produção, afetando menos o meio ambiente e permitindo a renovação dos recursos, daí a importância crescente desta área (Modolo, 2006).

A gestão ambiental apresenta-se como uma solução para o problema atual, envolvendo a mudança de comportamento face a decisões e no desenvolvimento de mecanismos. Posto isso, existe uma maior possibilidade de garantir a sustentabilidade dos processos construtivos, garantindo que a atividade humana não tem interferência nos ciclos naturais, conseguindo na mesma satisfazer as suas necessidades sem empobrecer o capital natural que posteriormente será transmitido às gerações futuras (Silva, 2009; Virtuoso, 2004).

Em termos de legislação Portuguesa, existe a norma NP EN ISO 14001:2012 – “Sistemas de Gestão Ambiental”. Nesta norma estão decretados os sistemas de gestão ambiental, de forma a impedir a criação de barreiras não tarifárias ao comércio, nem aumentar ou alterar as obrigações legais de uma organização, estando esta norma destinada a organizações de todo o tipo, sendo portanto uma norma abrangente que qualquer empresa pode respeitar atribuindo aos seus valores esta identidade.

É sem dúvida necessária a prevenção da geração de resíduos, de forma a diminuir este tipo de poluição ambiental e também a perda substancial de recursos. Para fazer face a este problema foi necessário estabelecer uma hierarquia de destinos possíveis para este tipo de resíduos, variando o tipo de gravidade para com o meio ambiente (Figura 2.1). Os tipos de tratamento/destinos finais para estes resíduos têm sido: reutilização, reciclagem, valorização energética, incineração com ou sem valorização energética, compostagem e, em último caso, aterro. Esta última alternativa é a menos desejável a nível ambiental, pois engloba a perda do valor potencial de alguns componentes depositados, para além de ocupar grandes áreas territoriais. No entanto, continua a ser o destino mais frequente para os resíduos sólidos (Modolo, 2006).

A reciclagem, reutilização e redução na exploração de recursos naturais são estratégias para criar uma sociedade mais sustentável. Considerando a escassez dos recursos naturais é necessário um desenvolvimento de técnicas no sentido de valorizar os resíduos, de maneira a que o impacto ambiental, deixado pela atividade humana, tenha cada vez menos significado (Fonseca, 2002).

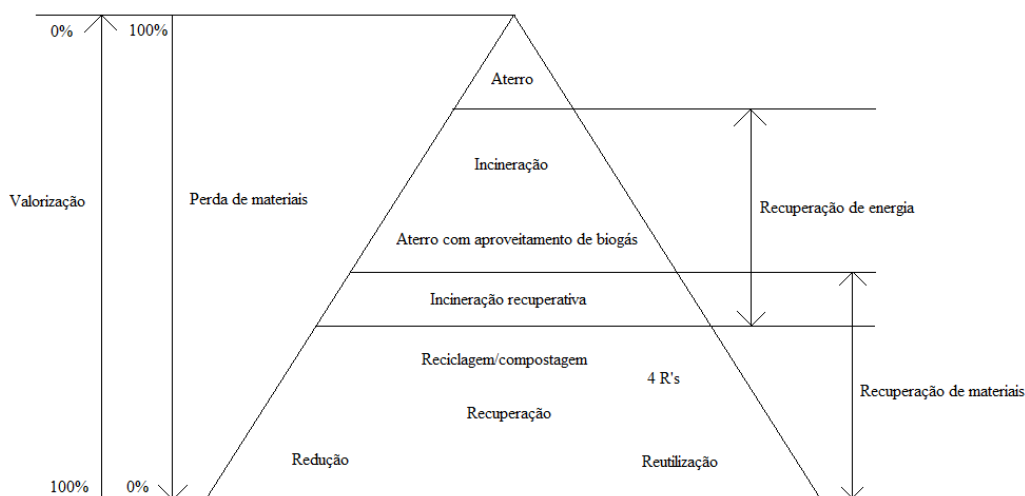


Figura 2.1 - Prioridades nos processos de gestão de resíduos sólidos (Modolo, 2006)

2.1 O Setor da Pasta e do Papel

Dois grandes setores consumidores de recursos são o da indústria da pasta e papel e o setor dos materiais de construção, pelo que a sua cooperação na área da valorização dos resíduos pode ser revelante.

O setor da pasta e do papel é um dos maiores contribuintes para o crescimento da economia portuguesa, representando um valor de exportações maior que o valor das importações, contribuindo desta forma para a Balança de Pagamentos e favorecendo assim o crescimento da economia (Dias, 2012).

Segundo o boletim estatístico da CELPA (2012a), associação da indústria papelreira, o volume de vendas em 2012 é superior a 2,3 mil milhões de euros, tendo aumentado 6% face a 2011. Em 2010 o sector representava 2% do Valor Acrescentado Bruto (VAB) nacional, 11% do VAB industrial, 4% do Produto Interno Bruto (PIB) e 9% da produção industrial nacional. O ano de 2012 ficou marcado pela recessão económica, fazendo descer o PIB português em 3,2% e levando o desemprego até a uma taxa próxima de 18%, acabando por afetar também as importações e exportações. No entanto, ainda assim o setor da indústria papelreira é um dos mais estruturantes da economia nacional. Segundo Pinto (2005) uma das maiores preocupações neste setor é o impacto ambiental causado pela exploração da floresta, daí o esforço na sua gestão sustentável em vários pontos, tais como no tratamento dos efluentes e das emissões, na redução do consumo de água e energia, na gestão dos resíduos, na recuperação de papéis usados e na reciclagem, entre outros. Apesar dos esforços técnicos e financeiros feitos, este setor ainda tem a necessidade de encontrar meios de valorização dos resíduos sólidos resultantes do processo de produção da pasta e papel.

A construção civil apresenta-se como uma boa solução para a valorização dos resíduos, por ser um setor que tem a possibilidade de escoar uma proporção elevada destes (Modolo, 2006).

2.1.1 Processo de produção da pasta de papel

Existem vários processos de fabrico de pasta de papel tanto de natureza mecânica como química (com soda, ao sulfito, kraft ou ao sulfato, etc). O processo predominante na atualidade é o “Kraft” sendo utilizado em mais de 75% dos casos, segundo Pinto (2005).

Justifica-se o seu destaque nesta dissertação com o facto de os dois resíduos, utilizados no procedimento experimental, serem gerados na fase de produção de energia (combustão de biomassa) deste processo.

O processo Kraft trata-se de um método químico que tem como objetivo a deslinhificação das aparas de madeira em pasta para papel, sendo preservada a resistência das fibras, obtendo-se assim uma pasta forte com rendimento entre os 50 e 60% (CELPA, 2012b). Trata-se de um processo mais simples, mais económico e tem como resultado pastas com melhores propriedades físicas, adequando-se a um mercado cada vez mais exigente (Martins, 2007).

Na Figura 2.2 está representada a produção de pasta de papel no processo Kraft e ilustrada a interdependência das unidades de operação, assim como os “produtos” intermediários envolvidos no processo.

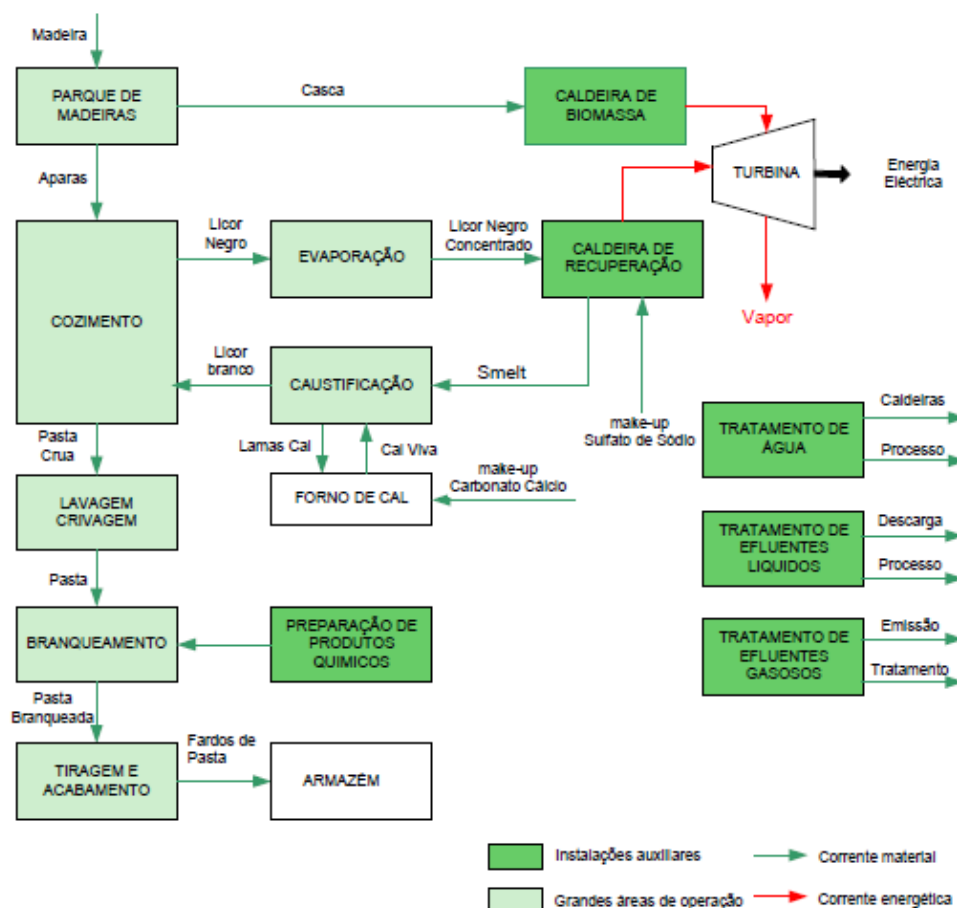


Figura 2.2 - Diagrama geral do processo de produção Kraft (Martins, 2007).

Neste processo existem várias etapas. A primeira etapa consiste na preparação da madeira e o cozimento das aparas, obtendo-se assim a pasta crua, e de seguida o branqueamento e a transferência para a fábrica de papel (incluindo a recuperação de energia e químicos). Ainda está incluída a fase de produção de dióxido de cloro e o tratamento de efluentes (Modolo, 2006).

Para a produção da pasta de papel pelo processo Kraft são necessárias as seguintes operações:

- **Preparação da madeira:** Corte dos troncos e o transporte para a fábrica, incluindo a lavagem e a separação da casca, onde os troncos são transformados em aparas ou cavacos nos destroçadores (com o objetivo de facilitar a dosagem da madeira no digestor);
- **Cozimento das aparas ou cavacos para obtenção da pasta crua:** O cozimento é a principal operação de fabrico. Neste processo o fundamento químico baseia-se na ação sobre a madeira, predominando na solução a soda cáustica e o sulfato de sódio;
- **Branqueamento:** Nesta fase a pasta é branqueada por oxidação e os pigmentos da madeira são assolados;
- **Lavagem:** Esta operação é responsável pela remoção de nós da madeira e de pedaços mal digeridos nos crivos centrífugos pressurizados (resultando uma pasta espessa e adensada);
- **Secagem:** A pasta passa por uma fase de secagem e de seguida é embalada para transporte, no caso de a fábrica não possuir máquina de papel (CELPA, 2012b; Dias, 2012; Modolo, 2006).

Este processo de fabrico de papel gera diversos resíduos sólidos resultantes do processo concetual, que serão alvo de estudo no subcapítulo 2.2. Na Figura 2.3 é possível visualizar a quantidade de resíduos produzidos anualmente devido ao fabrico de pastas e papéis.

Como se pode observar pela figura anterior, no ano de 2012 existe uma ligeira diminuição de resíduos gerados comparando com 2011, no entanto o número apresentado revela que ainda existe uma enorme conceção de resíduos sólidos, confirmando a necessidade de criar canais de escoamento pra os mesmos.

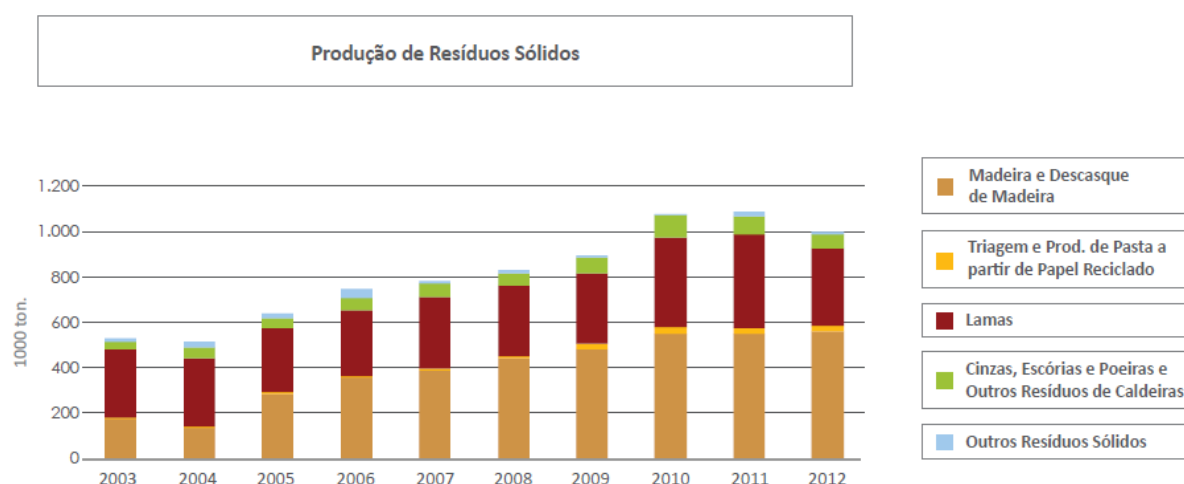


Figura 2.3 - Produção de Resíduos Sólidos (CELPA, 2012a)

Os resíduos resultantes do processo têm destinos diferentes consoante a sua origem. Analisando a Figura 2.4 pode-se concluir que, no ano de 2012, a aplicação de lamas e cinzas resultantes da queima de biomassa na agricultura e compostagem representou cerca de 15% do total de resíduos, já valorização por Outras Indústrias representou 3% do total. Por outro lado a valorização energética teve como percentagem representativa 62% dos resíduos e apenas 11% dos resíduos produzidos foi absorvido por aterro, sendo esta a última solução a adotar em termos ambientais (CELPA, 2012a).

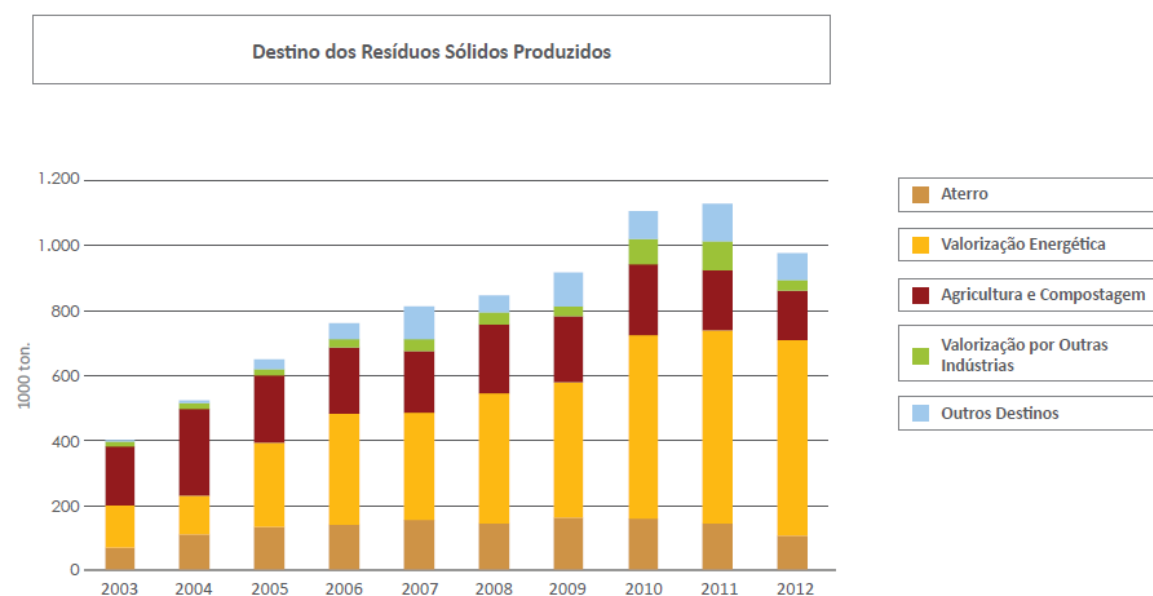


Figura 2.4 - Destino dos resíduos sólidos produzidos pela indústria papeleira (CELPA, 2012a)

2.1.2 Combustão de biomassa florestal e resíduos sólidos gerados

A fonte de energia da biomassa representa cerca de 15% da energia primária consumida em todo o mundo (EDP, 2004). Existem várias vantagens da utilização da energia de biomassa, como por exemplo o facto de se tratar de uma energia renovável, pouco poluente, altamente fiável e económica. Acarreta uma menor corrosão dos equipamentos (caldeiras, fornos, etc), minimiza o risco de incêndios florestais e incentiva à criação de um plano de ordenamento das florestas e de novas áreas de negócio (Energia, 2010).

Destacando o caso português de aproveitamento da biomassa florestal existem centrais termoelétricas em funcionamento, tais como a Central Termoelétrica de Mortágua (Figura 2.5) e a Centroliva em Vila Velha de Ródão, utilizando como resíduos florestais: ramos e bicadas de árvores, aparas de abate de árvores, pinhas secas, cascas e frutos, caruma e folhagem, material lenhoso abandonado e matos (Bessa, 2008).



Figura 2.5 - Central Termoelétrica de Mortágua (Mortágua, 2007)

Nesta dissertação foram testados resíduos sólidos gerados numa central termoelétrica a biomassa, numa unidade fabril parte do grupo Portucel/Soporcel, nomeadamente as cinzas de fundo e cinzas volantes, que resultam do processo de combustão de biomassa florestal em caldeira de leito fluidizado. Para tal revela-se importante e necessário conhecer o processo de combustão de biomassa florestal.

Existem vários processos de produção de energia elétrica via combustão direta (Figura 2.6), das quais se destacam as seguintes:

- Leito Fixo: Sistema de Grelha e Grelha com alimentação abaixo da grelha;
- Leito Fluidizado: Borbulhante (BFB) e Circulante (CFB);
- Sólidos Pulverizados (Gulyurtlu, 2007).

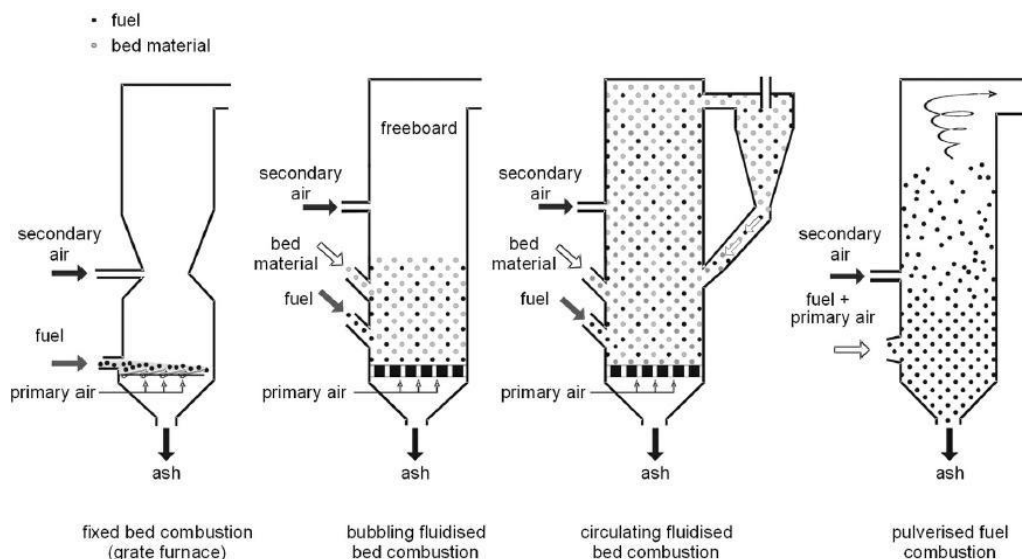


Figura 2.6 - Principais tecnologias de combustão de biomassa (Loo e Koppejan, 2008)

É destacado o processo de Leito Fluidizado, uma vez que é a partir deste processo que são geradas as cinzas de fundo e cinzas volantes, que posteriormente são incorporadas num solo alvo de estudo nesta dissertação. Este sistema de combustão reverte de um sistema de combustão em fornalha que contém um leito quente em suspensão de um material inerte, comumente areia siliciosa. O fundo da câmara de combustão é perfurado, desse fundo provém o ar primário que entra na câmara no sentido ascendente ao leito de biomassa, assim as partículas são sustentadas, convertendo o leito de biomassa numa massa de partículas e bolhas (Coelho, 2010; Loo e Koppejan, 2008).

2.2 Resíduos Sólidos Processuais e Estudos de Valorização

Este tipo de processo (Kraft), para além de originar os resíduos anteriormente referidos (cinzas de fundo e cinzas volantes), também gera outro tipo de resíduos, sendo importante conhecer em que fases existe esta produção, e complementar com estudos de valorização na área da construção civil.

De forma a simplificar o entendimento dos diferentes tipos de resíduos, gerados no processo de produção de pasta, é apresentado um esquema simplificado (Figura 2.7) onde se indica em que fases do processo se geram os respetivos resíduos.

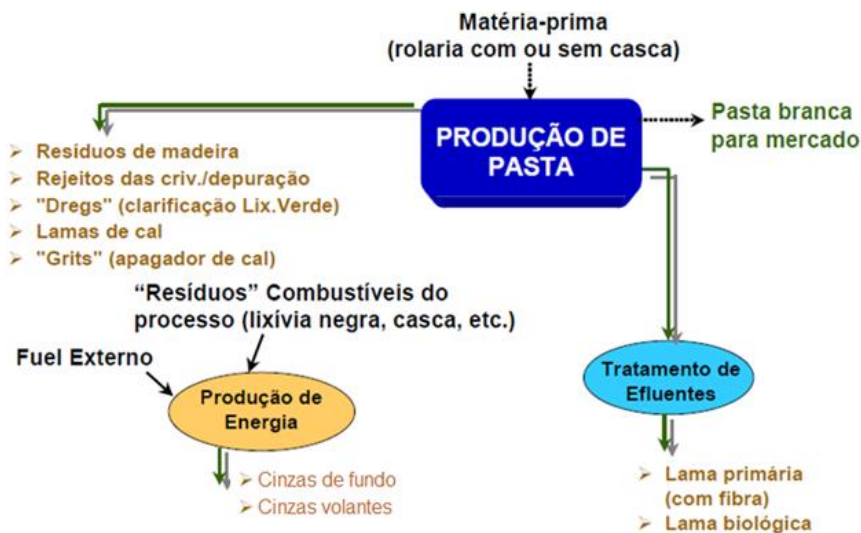


Figura 2.7 - Tipos de resíduos resultantes do processo Kraft e respetivas fases (Portucel/Soporcel, 2012)

Após uma análise do esquema, conclui-se que na produção da pasta de papel existem três momentos em que são gerados resíduos: a produção de pasta de papel, a produção de energia e o tratamento de efluentes.

Durante a produção de pasta de papel são diretamente gerados resíduos de madeira, rejeitos da crivação/depuração, dregs, lamas de cal e grits. Na fase de produção de energia resultam cinzas de fundo e cinzas volantes. Finalmente, no tratamento de efluentes são originadas lamas primárias (essencialmente constituídas por fibra) e lamas biológicas.

Pode-se dividir os resíduos gerados em dois grandes grupos: resíduos orgânicos e resíduos inorgânicos. Neste trabalho é apresentada informação relativamente às lamas primárias, lamas secundárias, dregs e grits, cinzas de fundo, cinzas volantes e lamas de carbonato de cálcio, de maneira a conhecer os principais resíduos produzidos nesta central. Estes resíduos serão descritos nos subcapítulos seguintes, iniciando pela forma como são gerados e apresentando de seguida os estudos já efetuados de valorização em materiais de construção.

2.2.1 Resíduos orgânicos

Estudando de uma forma mais específica o processo Kraft de fabrico de pasta de eucalipto, é utilizado um sistema de tratamento de efluentes líquidos funcionando com uma instalação de tratamento primário e outra de tratamento secundário do tipo lamas ativadas (representado na Figura 2.8), resultando resíduos como as lamas primárias e as lamas secundárias (Pinto, 2005).

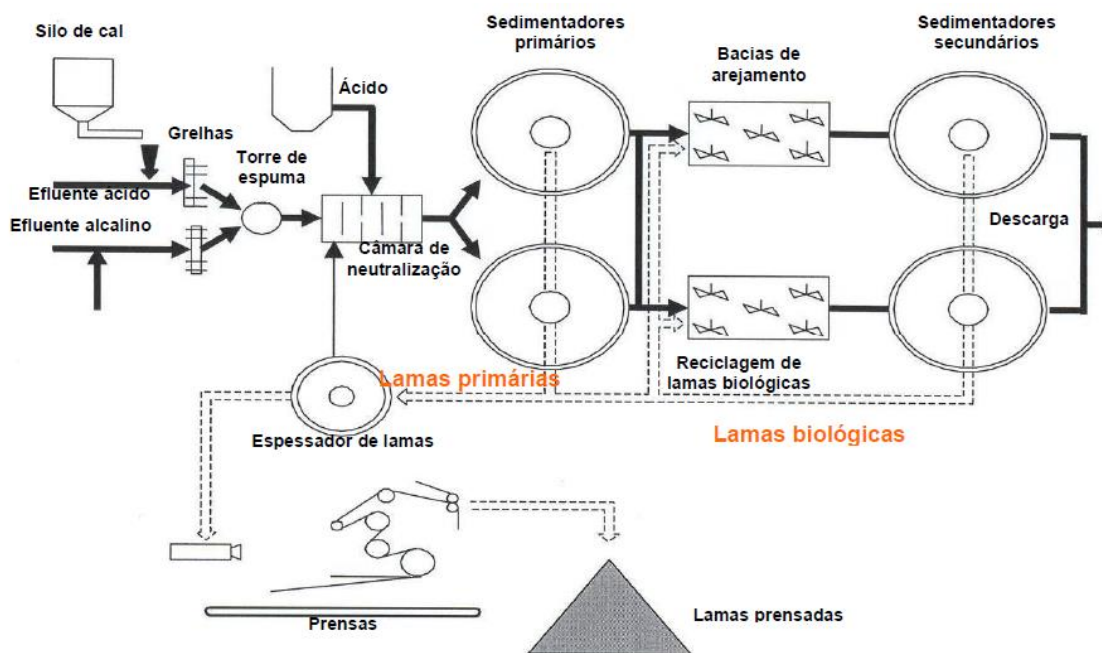


Figura 2.8 - Diagrama do processo de tratamento de efluentes líquidos (Pinto, 2005)

2.2.1.1 Lamas primárias

As lamas primárias são resíduos resultantes do tratamento primário de efluentes. Este tratamento resume-se a uma série de operações físicas tais como a gradagem, desarenação, medição de caudal e sedimentação primária (Hester, 1995; Thompson, 2001).

A gradagem trata-se da eliminação dos sólidos de maior dimensão, enquanto a desarenação é o processo de remoção dos sólidos inorgânicos com maior velocidade de sedimentação, que são constituídos na sua grande maioria por areias (EPA, 1998).

Ainda existindo matéria orgânica e inorgânica e outros sólidos suspensos tais como fibra, carbonatos, cálcio e resíduos da casca do parque de madeiras após a desarenação, estes

sólidos podem ser removidos na sua maioria no tanque de sedimentação primária, onde se depositam e se formam as lamas primárias (EPA, 1998).

Ahmadi e Al-Khaja (2001), concluíram que as lamas primárias podem ser utilizadas como um substituto para materiais de enchimento mineral, mais concretamente em betão não-estrutural na construção de alvenaria. Após resultados de testes que envolveram a criação de misturas de betão, contendo diferentes teores de resíduo (0, 3, 5, 8 e 10%) como substituto à areia fina, concluiu-se que utilizando um teor máximo de 5% de resíduos é possível a utilização com sucesso desta mistura em betões especificamente para a finalidade referida.

Segundo Azevedo (2003) existem várias soluções para o destino final das lamas resultantes do tratamento de efluentes, tais como a valorização agrícola, recuperação de solos, florestas, recobrimento de aterros sanitários, selagem de lixeiras (recuperação paisagística), construção civil (fábricas de tijolos), cerâmica (incorporação de 20 % de lamas), estradas (recuperação/sementeira de taludes), áreas verdes, co-incineração/cimento (incorporação no cimento, valor calorífico para a queima), incineração (combustível, valor calorífico para as incineradoras) e co-compostagem com Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).

Pinto (2005) utilizou as lamas primárias para a produção de agregados leves de argila expandida. Após a criação de várias formulações que fazem variar a percentagem de resíduos incorporados (entre 5 a 30%), conclui, recorrendo a ensaios industriais, que a incorporação de lamas primárias na matriz argilosa pode ser efetuada com sucesso entre os 20 e os 30% de percentagem de resíduo utilizado.

Tal como descrito anteriormente existem vários canais para valorizar este resíduo, entre os quais o estudo de Modolo et al. (2007) e Modolo et al. (2008) onde foi avaliada a substituição de pasta crua tradicionalmente utilizada (fibra longa) por lama primária no fabrico de fibrocimento, comprovando que é possível a incorporação de lamas primárias na formulação de fibrocimento mantendo-se a resistência mecânica e composição química, confirmando assim a potencialidade das lamas primárias neste tipo de aplicação.

2.2.1.2 Lamas secundárias (biológicas)

O principal objetivo do tratamento secundário consiste na remoção da matéria orgânica que ainda permanece, uma vez que geralmente após o tratamento primário ainda não é

garantida a qualidade exigida ao efluente final (Pires, 2009). As lamas secundárias biológicas resultam de um tratamento secundário no qual existe intervenção de micro-organismos, sendo estes beneficiados pela ação da incorporação de nutrientes, aumentando-lhes assim o conteúdo em matéria orgânica, atribuindo o nome a este tipo de resíduo (Thompson, 2001). A matéria orgânica é separada nos decantadores secundários, formando assim as lamas secundárias ou biológicas, sendo esta lama condensada em conjunto com a lama primária e de difícil desidratação (Modolo, 2006).

As lamas secundárias foram testadas na produção de agregados leves de argila expandida. Modolo et al. (2008), obtiveram resultados que conduzem a uma potencial incorporação de 5 a 10% de lamas biológicas, assim como Pinto (2005) que também obteve esta percentagem de incorporação ideal. Os resultados mostram que a substituição do óleo por lodo biológico não afeta as propriedades mais importantes do produto. Testes industriais apresentaram melhorias no desempenho ambiental devido à diminuição das emissões de gases nocivos para o ambiente, assim como a redução de custos.

Foram também realizados estudos no sentido de valorizar as lamas secundárias, incorporando-as em cerâmica estrutural de maneira a desenvolver um produto com propriedades térmicas e acústicas melhoradas. Concluiu-se que as propriedades do produto final se mantêm (resistência à compressão, dimensões, peso e densidade). No entanto, também as propriedades alvo de melhoria não se alteram, daí o principal objetivo não ser atingido falhando assim a intenção de valorizar o resíduo neste sentido (Modolo et al., 2008).

2.2.2 Resíduos inorgânicos

2.2.2.1 Dregs e grits

Resultantes da recuperação química do processo Kraft, os dregs são formados por partículas pequenas com cor acinzentada, sendo principalmente constituídos por carbonatos, hidróxidos e sulfuretos (Almeida et al., 2008). Este resíduo resulta da clarificação do licor verde, processo que acontece num tanque onde se dá a sedimentação dos dregs (Matias, 2012). Os grits são resíduos ricos em cálcio gerados no processo de apagamento da cal para produção do licor branco (soda cáustica) (CETESB, 2008).

Estes resíduos foram testados como substituto do pó-de-pedra na produção de mistura betuminosa para pavimentos rodoviários. Segundo Modolo et al. (2008), os grits são mais adequados que os dregs para este tipo de aplicação devido a inúmeros fatores, entre eles a distribuição granulométrica. Nesta área de desenvolvimento são necessários mais estudos para otimizar a quantidade de betume na mistura contendo resíduos, tornando então possível a aplicação em testes industriais a melhor composição encontrada.

Como proposta de valorização dos dregs, surgiu a incorporação em base e sub-base de construções rodoviárias (Júnior, 2010; Molina et al., 2004). Ambos os autores citados anteriormente obtiveram resultados de resistência à compressão das estruturas com valores acima dos limites mínimos para construção. O resíduo, juntamente com cal, acarreta um forte efeito ligante, traduzindo-se numa maior resistência à tração em comparação com a mistura solo-cal. A incorporação do resíduo é potencial caso seja utilizada uma baixa percentagem de incorporação com adição de cal para estabilizar.

No âmbito da produção de cerâmica estrutural foram realizados vários estudos para incorporação de dregs. Caux (2006); Ribeiro (2010) e Wolff (2008) concluíram que esta proposta de valorização é potencial, no entanto apenas para baixas percentagens de incorporação, nomeadamente para construção de tijolos (Caux, 2006; Ribeiro, 2010), e para telhas e blocos (Ribeiro, 2010).

No sentido de valorização dos dregs para produção de agregados leves, Pinto (2005) concluiu que a aplicação é potencial, no entanto com baixa percentagem de dregs incorporada.

Por fim, também foram realizados estudos no sentido de valorizar os dregs como substituto do cimento em betão estrutural. Garcia e Coutinho (2009); Modolo (2006) e Modolo et al. (2009) concluíram que neste tipo de aplicação os dregs podem ser utilizados para enchimento, mas nunca para substituição do cimento. Martins (2006), conferiu que os dregs têm potencial para serem utilizados, como substituto da matéria-prima conhecida como “farinha”, no fabrico de cimento.

2.2.2.2 Cinzas de fundo

Devido à conversão termoquímica de biomassa florestal, por combustão em caldeira de leito fluidizado, resultam gases prejudiciais ao ambiente, cinzas volantes e de fundo,

energia elétrica e térmica. As cinzas geradas neste tipo de fornalha são compostas predominantemente por areia, material que compõe o leito e inertes arrastados com a biomassa depositando-se num tanque de cinzas, correspondendo à fração de partículas grosseiras recolhidas na câmara de combustão primária, estando normalmente misturadas com areias, pedras e outras impurezas que acompanham a biomassa (Wildbacher, 2007).

No sentido de valorizar as cinzas de fundo são estudadas inúmeras aplicações no âmbito dos materiais de construção, sendo uma delas a aplicação deste tipo de resíduo em argamassas (funcionando como agregado) ou também em misturas betuminosas. Modolo et al. (2012) concluíram que existe uma grande potencialidade para este tipo de resíduo ser reciclado como agregado em argamassas industriais (em substituição a um tipo de areia calibrada convencionalmente usada), sendo necessário um pré-tratamento das cinzas com o objetivo de eliminar sais solúveis. A resistência mecânica e trabalhabilidade das argamassas que contêm cinzas podem ser controladas, de forma a atingir os valores requeridos para argamassas convencionais. No entanto, foram sugeridos mais testes para estudar a sustentabilidade desta solução, nomeadamente em aspetos ambientais e económicos.

Abordando uma solução para misturas betuminosas, as cinzas de fundo podem funcionar como substituto parcial de calcário moído. Modolo et al. (2012) utilizaram cinzas de biomassa para incorporar em misturas betuminosas, obtendo resultados que traduziram uma estabilidade mais elevada do material (até 10% de substituição das cinzas de fundo pelo calcário moído). Este tipo de aplicação tem potencial, no entanto, obtiveram-se valores de fluxo que, devido ao facto destes serem elevados, requerem um ajustamento nas formulações.

Dias (2011) aplicou cinzas de fundo na formulação de betão com o intuito de obter uma resistência mecânica adequada, de forma a que possam ser utilizadas para a construção de recifes artificiais e ao mesmo tempo de se tornarem um produto sem qualquer perigosidade para o ambiente. Concluindo que de facto é possível fazer a incorporação deste tipo de resíduo sem afetar o ambiente e a qualidade do material.

Pels et al. (2005) concluíram que as cinzas de fundo de combustão em caldeira de leito fluidizado são as mais simples de utilizar para materiais de construção, por serem maioritariamente compostas por areia, tornam-se um potencial substituto para outros tipo

de areia, na construção de pavimentos. Este resíduo pode-se aplicar no betão com adição ao cimento, conforme também concluído por outros autores anteriormente citados.

Aggarwal et al. (2007) estudaram o efeito das cinzas de fundo como substituto de agregados finos no betão, concluindo que a resistência à compressão do betão com 50% de cinzas de fundo incorporadas é aceitável para a maioria das aplicações estruturais, uma vez que essa resistência é superior 20MPa aos 28 dias. Mesmo apresentando valores de resistência inferiores a betões sem incorporação deste tipo de resíduo, justifica-se o investimento nesta área, possibilitando assim o escoamento de grandes quantidades de resíduos.

Whittaker et al. (s.d.) estudaram a possibilidade de substituição de cimento Portland por cinzas de fundo em argamassas. Concluíram que se a substituição for em quantidades de cerca de 40% existe um decréscimo do desempenho do material, no entanto, é possível a sua incorporação até 10% sem alterar a qualidade do mesmo.

Jackson et al. (2009) avaliaram a viabilidade da aplicação do resíduo em causa (resultante da combustão de sólidos em caldeira de leito fluidizado) em pavimentos, obtendo resultados que se traduzem num uso vantajoso na estabilização de leitos de pavimentos e camadas de base.

2.2.2.3 Cinzas volantes

As cinzas volantes são cinzas de uma textura mais fina arrastadas pelos gases das fornalhas da caldeira. São denominadas como volantes pelo facto de resultarem do funcionamento do sistema de remoção de poeiras dos gases de exaustão (Dias, 2011; Silva et al., 1999).

A valorização das cinzas volantes tem-se tornado viável na indústria do cimento, agregados leves de argila expandida e sub-base de pavimentos rodoviários, tendo como uma vantagem global, a redução de custos associados (Ahmaruzzaman, 2010).

Existem essencialmente três tipos de aplicações viáveis deste resíduo no cimento, incluindo a substituição do cimento Portland no fabrico de betão (Joshi e Lothia, 1997), como material pozolânico na produção cimento pozolânico (Mukherjee et al., 2008), e como um possível substituto do gesso (Bhattacharjee e Kandpal, 2002).

A aplicação de cinzas volantes no betão aumenta a sua trabalhabilidade, sendo recomendada a sua aplicação como um substituto parcial do cimento, reduzindo assim o custo da obra, o que atualmente se torna um fator importantíssimo para a indústria da construção. Ainda segundo Ahmaruzzaman (2010), betões com incorporação de cinzas volantes concebem uma maior proteção e estabilidade contra o desgaste natural do elemento, sendo assim uma mais-valia a incorporação deste resíduo. As cinzas volantes também podem ser aplicadas em pavimentos rodoviários, sem pôr em causa a qualidade da construção, e ainda tornando mais exequível economicamente a obra, reduzindo o custo de construção em cerca de 10 a 20%.

Maslehuddim (1989) aferiu que a adição de cinzas volantes, como mistura, aumenta a resistência à compressão ao fim do tempo de cura e a resistência à corrosão do betão.

É também estudada a utilização de cinzas volantes na construção de barragens de betão, Gao et al. (2007) concluíram que a resistência à compressão do betão aos 90 dias, em barragens com a incorporação de 50% de cinzas volantes, é superior, do que se essa percentagem for de 30% ou mesmo sem a adição de cinzas. Concluíram também que surgem melhorias na deformação do betão, que de facto é menor com a adição do resíduo, entre outras vantagens tais como a redução da tensão expansiva em cerca de 50%.

Foram também realizados estudos no sentido de valorizar este resíduo em agregados leves, onde, em investigações efetuadas, comprovou-se que as cinzas volantes podem melhorar a resistência à compressão dos tijolos e torná-los mais resistentes a ações atmosféricas adversas (Lingling et al., 2005).

2.2.2.4 Lamas de carbonato

As lamas de carbonato são lamas geradas nos filtros de lama de cal (carbonato de cálcio) (CETESB, 2008).

Para este tipo de resíduo, estuda-se uma possível valorização como agregado de argamassas. Modolo et al. (2011) concluíram que as propriedades das argamassas não são prejudicadas pela adição de lamas de carbonato em substituição parcial do filer calcário. Esta pode ser uma solução para valorizar este tipo de resíduo que representa milhares de toneladas geradas por ano dos resíduos sólidos da indústria da pasta e do papel, evitando a deposição destes resíduos em aterro e o desperdício de recursos naturais, como o calcário.

Eroglu et al. (2007) estudaram a aplicação de lama de cal no fabrico de cimento e concluem que este resíduo torna-se praticamente um aditivo para esta aplicação.

Carvalho (2006) testou a lama de cal como adição em argamassa para construção civil, avaliando as propriedades mecânicas de resistência, em três situações distintas: argamassa simples de referência (cimento, areia e água); argamassa contendo adições de resíduos em diversas proporções, e argamassa com adições de cal hidratada. Os resultados dos ensaios no estado plástico apresentam trabalhabilidade e aplicabilidade aceitáveis e, no estado endurecido, mostram que as adições do resíduo, nos teores de 20% e 80%, ministram ganhos de resistência mecânica à compressão de 28% e à tração de 76%. Concluindo-se que a incorporação deste resíduo como aditivo em argamassa é viável tanto a nível técnico, económico como ambiental.

2.3 Pavimentos Rodoviários

A valorização de resíduos, nomeadamente de cinzas de fundo e cinzas volantes, pode ser implementada nesta área específica da construção civil, assim como vários estudos anteriormente mencionados no subcapítulo “*Resíduos Sólidos Processuais e Estudos de Valorização*” confirmaram a potencialidade da valorização de resíduos neste setor. Nesta dissertação está presente a intensão da valorização de resíduos na fundação de pavimentos rodoviários.

Devido à construção de vias rodoviárias, existe um consumo elevado de agregados naturais, estimando-se que apenas na Europa o consumo seja maior do que 2,5 milhões de toneladas anualmente (Reis-de-Barros et al., 2006).

Os resíduos, considerados materiais de natureza adversa, acarretam preocupações quer a nível de comportamento mecânico quer a nível ambiental, levando a que estes materiais alternativos ainda não representem uma aplicação significativa, apesar das taxas para a deposição em aterro e exploração de agregados naturais sejam praticadas pelos governos na maioria dos países europeus (Reis-de-Barros et al., 2002).

Deve-se referir também que existem gastos associados à utilização de resíduos, tais como o transporte e tratamentos necessários para garantir uma boa resposta do material face às exigências técnicas, obrigando a um gasto de energia adicional e emissões extra, tendo como consequência o aumento do custo desta valorização dos resíduos (Huang et al.,

2007). Pelo motivo apresentado anteriormente é importante incentivar estudos que visem a valorização de resíduos no setor dos pavimentos rodoviários, de maneira a que as obras em questão não sejam agravadas economicamente pela adição de resíduos.

Os pavimentos rodoviários são formados por várias camadas, que estão mais ou menos ligadas entre si, apoiando-se sobre a fundação. A deformação destas estruturas acaba por depender de uma forma elevada da resistência da fundação, assumindo assim um papel especificamente importante no dimensionamento e no desempenho dos pavimentos (Branco et al., 2008). Segundo o caderno de encargos Estradas de Portugal (2009), os aterros são constituídos estruturalmente pelas seguintes zonas:

Parte Inferior do Aterro (PIA) – Zona do aterro que assenta sobre a fundação.

Parte Superior do Aterro (PSA) – Zona do aterro que serve de apoio para a camada do Leito do Pavimento, que integra a fundação do pavimento influenciando o seu comportamento.

Corpo – Parte do aterro que é compreendida entre a PIA e a PSA.

Leito do Pavimento – Última “camada” do aterro, sendo esta a camada que deve atribuir boas condições de fundação ao pavimentos.

Espaldar – Zona lateral do corpo do aterro que inclui os taludes.

A Parte Superior do Aterro e o Leito do Pavimento constituem a **fundação do pavimento**.

A fundação do pavimento é sem dúvida uma importante parte dos pavimentos rodoviários, daí estarem definidas várias funções que esta camada deve respeitar. Essas funções passam por assegurar uma superfície regular e uma capacidade de suporte significativa, de maneira a ser possível a construção da primeira camada do pavimento com espessura e grau de compactação desejados; assegurar uma capacidade de suporte necessária para um bom funcionamento do pavimento e permitir a drenagem da água das chuvas e a circulação do equipamento de obra antes da construção do pavimento. Estas funções devem ser asseguradas para pavimentos onde o tráfego é mais intenso e pesado, no entanto, para estradas de pequena importância e com tráfego reduzido e lento (caminhos rurais, caminhos florestais) é possível utilizar a superfície superior dos terraplenos como superfície de rolamento dos veículos. Também em “estradas de terra” pode não ser

necessária uma pavimentação para assegurar o suporte de tráfego com sucesso em tempo seco e, por vezes, até em tempo chuvoso (Branco et al., 2008).

O leito do pavimento é uma parte integrante da fundação do pavimento, servindo esta camada para melhorar as características da fundação devendo também assegurar uma maior estabilidade face à quantidade de terrenos de natureza litológica diferente. Normalmente nos extremos da escavação encontram-se solos mais superficiais (habitualmente de pior qualidade) e em profundidade são encontrados solos melhores, até mesmo terreno rochoso. Face a esta variedade de terrenos é necessária a existência do leito do pavimento (Branco et al., 2008).

Segundo Estradas de Portugal (2009) os materiais para camadas de leito do pavimento em solos, deverão obedecer às seguintes características:

• Dimensão máxima	75mm
• % de material que passa no peneiro nº200 ASTM máximo	20%
• Limite de liquidez máximo	25%
• Índice de plasticidade máximo	6%
• Equivalente de Areia mínimo	30%
• Valor de azul-de-metileno (dimensão <75µ) máximo	2,0
• CBR (a 95% da baridade máxima, compactação pesada) mínimo	10%
• Expansibilidade máxima	1,5%
• Matéria orgânica máxima	0%

Por outro lado, os solos presentes na sub-base dos pavimentos rodoviários, zona também interessante no âmbito da aplicação de resíduos utilizados neste estudo (cinzas de fundo e cinzas volantes) devem, segundo Estradas de Portugal (2009), apresentar as seguintes características:

• Limite de liquidez máximo	25%
• Índice de plasticidade máximo	6%
• Equivalente de areia mínimo	30%
• Valor de azul-de-metileno máximo (dimensão <75µ)	1,5
• CBR (a 95% da baridade máxima, compactação pesada) mínimo	20%
• % de material que passa no peneiro nº200 ASTM máximo	15%

- Dimensão máxima 75mm
- Matéria orgânica máxima 0%

Existe também, no Manual de Conceção de Pavimentos, para a Rede Rodoviária Nacional (MACOPAV), uma catalogação dos diversos tipos de solo que se pode encontrar no decurso das terraplanagens, sendo classificados de S0 a S5 (sendo o S0 o solo menos favorável a utilizar na fundação do pavimento, e S5 o mais favorável para os mesmos fins) tendo em conta as suas características geotécnicas pela Classificação Unificada e o valor do CBR (Branco et al., 2008). Este tipo de catalogação é importante na medida que é possível avaliar a classe do solo rapidamente, após tratamento de dados do ensaio CBR.

Ao longo deste estudo são reunidos dados de maneira a perceber se é possível o escoamento de resíduos nas fundações de pavimentos, sendo cruzada a informação apresentada neste subcapítulo com os resultados obtidos em laboratório.

CAPÍTULO 3

Procedimento Experimental

Descrição Geral

Metodologia Experimental

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Descrição Geral

Para atingir os objetivos traçados no início deste estudo optou-se por averiguar a viabilidade de dois tipos de soluções.

A primeira solução implica revolver o solo com resíduos, contendo cada mistura 50% de solo de fundação e 50% de uma mistura de resíduos e ligante. Para avaliar a viabilidade deste tipo de solução é necessário realizar uma caracterização geral de cada componente, neste caso das amostras de solo, cinzas de fundo e cinzas volantes recolhidas, e também uma análise geral das 3 misturas utilizadas. As amostras de solo foram recolhidas em 3 locais distintos, com o intuito de corroborar resultados de caracterização do solo, sendo o primeiro local denominado por “REF” (referência) efetuando-se um paralelismo com o ensaio de campo, pois é um solo que contém *tout-venant* numa das suas camadas de pavimento e que durante a experiencia de campo não sofre qualquer depósito de resíduo, daí o nome associado. O segundo local onde foi recolhido solo denomina-se por “SBA” (solo *bottom ashes*) devido à deposição de cinzas de fundo na experiencia de campo. Finalmente, o terceiro local de recolha de solo, denominado por “SF” (solo de fundação), trata-se de um solo recolhido a maior profundidade, sem a camada de *tout-venant*, implicando um maior interesse e viabilidade nos resultados, pois o intuito passa por analisar um solo virgem.

São analisadas 3 misturas, na averiguação da viabilidade da solução que implica um revolvimento do solo com aditivos. A primeira mistura contém solo de fundação (SF) e cinzas de fundo (CF); a segunda contém solo de fundação (SF), cinzas de fundo (CF) e cinzas volantes (CV); a terceira mistura tem como constituintes solo de fundação (SF), cinzas de fundo (CF) e cal hidráulica (CH).

Na Tabela 3.1 encontram-se as percentagens (de peso), dos componentes utilizados em cada mistura da caracterização geral.

Tabela 3.1 - Percentagens dos componentes utilizados nas misturas – Caracterização geral

Mistura	% SF	% CF	% CV	% CH
1	50	50	0	0
2	50	25	25	0
3	50	45	0	5

Toma-se como prioritário obter informações sobre estas 3 amostras em específico devido à composição residual que as constituem. O resíduos prioritários, a serem alvo de valorização, são as cinzas de fundo, daí se ter optado por criar uma mistura onde só atua este resíduo.

É conhecido, segundo o estudo de Tarelho et al. (2012), que em termos de geração de cinzas de fundo e cinzas volantes, a relação pode ir até 50% em percentagem, motivo pelo qual a mistura 2 possui valor quantitativo equivalente dos dois resíduos. No caso da mistura 3, optou-se por adicionar 10% de Cal Hidráulica (CH) em relação à mistura de resíduos (perfazendo um total de 5% relacionando com o volume total), com o objetivo de dar alguma consistência às cinzas de fundo, havendo assim um ligante a atuar. Esta última mistura foi necessária devido à pouca consistência esperada da mistura 1, tentando-se perceber se a adição baixa de cal hidráulica serve para ligar o resíduo tornando todo o material presente na mistura mais consistente.

Tomou-se a decisão de, para cada mistura, utilizar solo de fundação para 50% da quantidade total em peso, e 50% de mistura de resíduo. O fator motivador passa pela possibilidade de existir uma clara indicação das alterações que ocorrem no solo com a aplicação de resíduos, de maneira a que a sua adição não seja pouca ao ponto de não se notarem alterações, nem exagerada impossibilitando a análise pretendida.

A segunda solução trata-se da aplicação superficial dos resíduos sobre um solo, avaliando-se a sua viabilidade através de um ensaio de campo, onde são aplicadas cinzas de fundo em grande escala. Foi também realizada uma simulação laboratorial, onde são aplicadas as 3 misturas de resíduo sobre o mesmo solo de fundação utilizado na experiência de campo mas, neste caso, a experiência terá lugar num ambiente laboratorial controlado, e será realizada em pequena escala.

A simulação laboratorial é realizada paralelamente com o ensaio de campo onde são aplicadas 3 misturas de resíduos diretamente sobre o solo de fundação, recolhido no local

onde é realizado o ensaio de campo. Na Tabela 3.2 são apresentadas as percentagens dos componentes utilizados nas misturas. A mistura 1 apenas denomina-se como “mistura” por questões de simplificação de nomenclatura, pois na sua constituição estão apenas cinzas de fundo, simulando a própria experiência de campo.

Tabela 3.2 - Percentagem dos componentes utilizados nas misturas – Simulação laboratorial

Mistura	% CF	% CV	% CH
1	100	0	0
2	50	50	0
3	90	0	10

As misturas utilizadas nas duas soluções são diferentes na medida em que num dos casos existe 50% de solo de fundação, enquanto no outro é apenas estudado o comportamento do resíduo sem a presença de solo. Utiliza-se a mesma nomenclatura para facilitar a comparação de resultados realizada posteriormente nesta dissertação.

3.2 Metodologia Experimental

Como procedimento experimental realizaram-se ensaios de maneira a determinar os parâmetros mais relevantes do solo e resíduos utilizados neste estudo, caracterizando as amostras a vários níveis, e conhecendo a matéria-prima utilizada em todo o caso de estudo.

Como metodologia para a realização desta dissertação são realizados os seguintes procedimentos:

- Recolha de amostras do solo de fundação (sem a aplicação de resíduos) e a sua caracterização;
- Avaliação experimental das amostras de solo, resíduos e misturas;
- Aplicação de uma camada de cinzas de fundo no terreno cedido para a experiência de campo;
- Realização de uma simulação controlada em laboratório de forma a perceber o comportamento dos resíduos num ambiente não adulterado, tornando possível também a aplicação de várias misturas de resíduos sobre um solo, alargando assim a possibilidade de escoamento dos mesmos (realizado paralelamente com a experiência de campo);

e) Análise de viabilidade das soluções de valorização dos resíduos.

O terreno alvo de intervenção na atividade experimental (experiência de campo) abrange uma área de cerca de 10x10m². Em três quartos desta área são adicionadas cinzas de fundo, os outros 25m² não são alvo de incorporação de resíduo para possível comparação de resultados.

Os recipientes utilizados na simulação contêm dimensões idênticas e são montadas da mesma forma, de maneira a haver variação apenas a nível composicional.

Na Tabela 3.3 encontram-se indicados os ensaios experimentais realizados para os diferentes tipos de amostras. As misturas M1, M2 e M3 dizem respeito à análise realizada para a caracterização geral, por outro lado os recipientes R1, R2 e R3 dizem respeito à simulação laboratorial.

Tabela 3.3 - Ensaios realizados

Ensaio Realizados	Amostras										
	REF	SBA	S.F	C.F	C.V	M1	M2	M3	R1	R2	R3
T.H	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	✓	✓	✓
A.G	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-
L.L	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
L.P	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
E.A	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-
A.M	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-
A.T	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	-	-
Proctor	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	-	-	-
CBR	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	-	-	-
FRX	-	-	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-
DRX	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-
Q.C	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	-	-	-
E.P	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓
Esclerómetro	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓
Ultra-sons	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓
E.C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓
E.F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓
P.A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-

Onde,

T.H – Teor de Humidade;

A.G – Análise Granulométrica;

L.L – Limite de Liquidez;

FRX – Florescência de Raio-X;

DRX – Difração de Raio-X;

Q.C – Quantificação de Cloretos;

L.P – Limite de Plasticidade;

E.A – Equivalente de Areia;

A.M – Azul-de-metileno;

CBR – “*California Bearing Ratio*”;

A.T – Análise Térmica;

E.P – Ensaio à Penetração;

E.C – Ensaio à Compressão;

E.F – Ensaio à Flexão;

P.A – Princípio de Arquimedes.

A determinação dos parâmetros de caracterização do solo e resíduos aplicados é essencial, de maneira a ser possível entender as propriedades físicas, químicas e mecânicas das amostras em questão (solo, resíduos e misturas) para tal realizou-se uma campanha extensiva de ensaios laboratoriais. Primeiramente determina-se o teor de humidade da amostra recolhida, para ser possível ter uma noção do seu estado natural, uma vez que a amostra foi recolhida após um longo período de precipitação. Em termos de caracterização física procede-se à realização de análises granulométricas, grau de impurezas, limites de Atterberg e massa volúmica. Realiza-se também a uma caracterização mecânica do solo e misturas, de maneira a avaliar a sua resistência, através dos ensaios de Proctor e CBR. Em termos de avaliação química e mineralógica são feitas análises de Florescência por Raio X (FRX), Difração por Raio X (DRX) e quantificação de cloretos por potenciometria. Quanto ao simulacro efetuaram-se ensaios não destrutivos, tais como o ensaio de penetração e esclerómetro, de seguida procedeu-se a ensaios que exigem a recolha de amostras, obrigando a desmontagem dos recipientes, efetuando-se ensaios de resistência máxima à compressão e à flexão, ultra-sons e ensaios utilizando o Princípio de Arquimedes.

3.2.1 Recolha dos materiais utilizados

As amostras utilizadas para este estudo foram recolhidas num parque de madeiras de uma unidade fabril de pasta e papel, nomeadamente do grupo Portucel/Soporcel.

Inicialmente foi realizada uma recolha de amostras, através do método de recolha de amostras compostas, tendo sido efetuadas várias escavações até se obter o perfil em profundidade do solo (Figura 3.1).



Figura 3.1 - Escavação e perfil do solo virgem

As amostras recolhidas em 4 localizações distintas foram armazenadas em sacos de plástico, de maneira ao seu transporte ser realizado em condições convenientes até à sua utilização.

As cinzas de fundo e cinzas volantes foram também recolhidas na mesma unidade fabril em que se encontrava o solo, sendo os dois resíduos recolhidos nas mesmas condições de operação da fornalha e utilizados para todo o procedimento experimental, de maneira a ser possível afirmar que estamos perante amostras com as mesmas características ao longo de todo o estudo, diminuindo assim a entropia do sistema e obtendo resultados mais fiáveis.

3.2.2 Caracterização geral

De maneira a avaliar os componentes utilizados neste estudo é feita uma caracterização geral. Esta caracterização permite avaliar a viabilidade da primeira solução, que implica o revolvimento do solo com resíduos, e ainda fornecer dados para análise da segunda solução cujo fundamento é a aplicação de resíduos na superfície do solo.

3.2.2.1 Teor de humidade

Este ensaio é realizado de acordo com a norma ISO/TS 17892-1 e visa a determinação do teor de humidade presente nas amostras de solo e resíduos em estado natural.

Este ensaio foi realizado após períodos de precipitação, sendo esperado que as amostras se encontrem com um teor de humidade ligeiramente elevado. O valor do teor de humidade presente no solo revela-se importante, porque indica o estado em que as amostras se encontram naturalmente.

Para o cálculo da humidade presente nas amostras é necessário realizar a pesagem de uma quantidade de amostra de solo húmido, sendo efetuada de seguida a secagem do material

em estufa a 105°C. Sabendo o peso da amostra húmida e da amostra seca é possível utilizar a equação 3.1 para o cálculo do teor de humidade em base seca.

$$h = \frac{P - P_s}{P_s} \quad 3.1$$

Onde,

h - Teor de humidade [%];

P - Peso da amostra húmida [g];

P_s - Peso da amostra seca [g].

3.2.2.2 *Análise granulométrica*

A composição granulométrica é definida como a distribuição em percentagem ponderal (percentagem do peso total) das partículas do solo de acordo com as suas dimensões (Fernandes, 2006). Este método tem como objetivo a determinação da percentagem de peso, relativas a cada fração retida em peneiros com malhas pré-estabelecidas e normalizadas, em relação à massa total da amostra em questão, sendo o resultado final expresso num gráfico cuja eixo das ordenadas apresenta os valores da percentagem passada de amostra, enquanto no eixo das abcissas se encontra expressa a abertura dos peneiros (dimensão em milímetros) numa escala logarítmica.

Este ensaio é importante pois o comportamento das amostras depende da forma e dimensões das partículas presentes nas respetivas constituições.

Inicialmente procede-se à secagem da amostra natural em estufa a 105°C, de maneira a eliminar toda a humidade para impedir a agregação das partículas finas. O método para realização da análise granulométrica é o método da peneiração por via húmida, cujo procedimento se inicia com lavagem, eliminando então os finos, e de seguida com a peneiração a seco (Figura 3.2).



Figura 3.2 - Amostras após peneiração a seco (cinzas de fundo)

A peneiração é realizada segundo as normas NP EN 933-1, NP EN 933-2, recorrendo a uma série de peneiros de malha quadrada (dimensões em milímetros): 0,063; 0,125; 0,250; 0,500; 1; 2; 4; 8; 16; 31,5 e 63 (Figura 3.3).

O cálculo efetuado para se obter a percentagem acumulada de amostra passada é representado pela equação 3.2.

$$\%Material\ retido = 100 - \left(\frac{R_i}{M_i} \times 100 \right) \quad 3.2$$

Onde,

R_i - Massa retida em cada peneiro [g];

M_i - Massa seca total da amostra [g].



Figura 3.3 - Série de peneiros utilizada na mesa de agitação

3.2.2.3 Grau de impurezas

Para a realização deste ensaio utilizam-se as normas NP EN 933-9/2002, que diz respeito ao ensaio de azul-de-metileno, e NP EN 933-8/2002 correspondendo ao ensaio de equivalente de areia. A presença de impurezas nos agregados (argila, matéria orgânica, etc.) acarreta uma redução no atrito entre os grãos, surgindo uma forte probabilidade da ocorrência de variações volumétricas na presença de água, assim como a dificuldade do envolvimento pelos ligantes (Castelo-Branco, 1996), sendo para isso importante caracterizar o nível de impurezas presente nas amostras, para adquirir conhecimento sobre as alterações que a adição de resíduos impõe.

O valor que resulta do ensaio “Equivalente de Areia” permite avaliar a quantidade de matéria muito fina associada a matéria mais grosseira, definindo assim se o material a avaliar está limpo. Este ensaio consiste na colocação numa proveta cilíndrica, 120g da amostra passada pelo peneiro de malha quadrangular de 2mm, juntamente com solução floculante até à marca delimitada inferiormente na proveta. Após agitação da mistura e posterior repouso adiciona-se mais solução floculante para ser realizada a limpeza da proveta, agitando-se o conteúdo para facilitar a ascensão dos finos e componentes argilosos. Este procedimento repete-se até o nível do líquido atingir a marca superior. De seguida, a proveta cilíndrica fica em repouso durante 20 minutos, fazendo com que o material mais grosso rapidamente se deposite no fundo, enquanto o material mais fino se mantém em suspensão (Figura 3.4).



Figura 3.4 - Ensaio do Equivalente de Areia

O teor de equivalente de areia (EA) é calculado pela equação 3.3.

$$EA = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad 3.3$$

Sendo h_1 a altura da camada superior do floculado até à base da proveta (em mm) e h_2 a distância entre a face inferior da cabeça do mergulhador e a face superior do anel (em mm) (Figura 3.5).

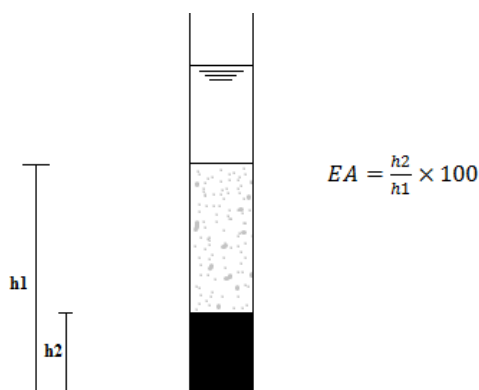


Figura 3.5 - Determinação do Equivalente de Areia

O ensaio de “Teor de Equivalente de Areia” é realizado sobre duas amostras com a mesma composição em simultâneo. O valor final de EA resulta de uma média ponderada dos resultados obtidos em cada amostra.

O mecanismo da adsorção de azul-de-metileno pelas partículas consiste na permuta iónica entre os cátions existentes na superfície dessas partículas, como por exemplo os cátions de cálcio, sódio, magnésio e potássio, e os cátions resultantes da dissociação da molécula de azul-de-metileno em solução aquosa. Em consequência desta troca catiónica forma-se à volta da partícula uma camada monomolecular de azul-de-metileno.

O princípio do ensaio consiste em introduzir quantidades crescentes de solução de azul-de-metileno, por doses sucessivas, até que a superfície das partículas que têm capacidade de adsorção esteja coberta (Figura 3.6).



Figura 3.6 - Ensaio Azul-de-Metileno

Concluída esta fase, passa a existir um excesso de azul-de-metileno na preparação, correspondendo ao ponto de viragem que marca o fim do ensaio e que pode ser detetado pelo teste da mancha. Este teste consiste em colocar uma gota da preparação num papel de filtro e verificar se existe uma auréola azul mais clara no bordo da mancha. A presença de auréola traduz a existência de azul-de-metileno livre na preparação, evidenciando que todas as partículas suscetíveis de adsorverem azul-de-metileno estão cobertas por uma camada de moléculas daquela substância (Figura 3.7).



Figura 3.7 - Mancha azul-de-metileno da amostra de cinzas volantes

Segundo a norma francesa para construção de aterros e leito de pavimento NF P18-592, o VBS é o valor de azul-de-metileno absorvido por 100 gramas de solo.

Após verificada a presença de corante livre, o VBS é calculado através da equação 3.4.

$$VBS = \frac{V_i}{M_i} \times 100 \quad 3.4$$

Onde,

M_i - massa do provete [g];

V_i - volume total de solução corante adicionado [ml].

Na Tabela 3.4 encontra-se o significado do valor de VBS para solos.

Tabela 3.4 - Significado do VBS para solos (Branco et al., 2008)

VBS (g/100g de solo)	Descrição
$VBS \leq 0,1$	Solos insensíveis à água
$0,1 < VBS \leq 0,2$	Solos muito pouco sensíveis à água
$0,2 < VBS < 1,5$	Solos com sensibilidade à água
$VBS = 1,5$	Valor que distingue os solos areno-siltosos dos areno-argilosos
$VBS = 2,5$	Valor que distingue os solos siltosos pouco plásticos dos medianamente plásticos
$VBS = 6,0$	Valor que distingue os solos siltosos dos argilosos
$VBS = 8,0$	Valor que distingue os solos argilosos dos solos muito argilosos

3.2.2.4 Limites de Atterberg

Estes ensaios são realizados de acordo com a norma portuguesa ISO/TS 17892-12, e apresentam importância para o estudo no sentido de conhecer as propriedades físicas do solo utilizado ao longo deste estudo.

O ensaio dos Limites de Atterberg tem como objetivo a determinação do Limite de Liquidez (LL) e de Plasticidade (LP):

- **Limite de Liquidez (LL)** é o teor em água que serve como fronteira entre um comportamento do solo fluido e um comportamento moldável, sendo assim possível a classificação dos solos quanto à plasticidade;
- **Limite de Plasticidade (LP)** é o teor em água que serve como fronteira entre um comportamento moldável e um comportamento friável (Sousa, 2011).

Com o conhecimento dos dois limites calculados é possível também calcular o **Índice de Plasticidade (IP)**, definindo-se como a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade e cujo significado se encontra na Tabela 3.5, apresentada seguidamente.

Tabela 3.5 - Classificação de Atterberg baseado no comportamento “plástico” dos solos

Índice de Plasticidade	Plasticidade
0-1	Solo não plástico
1-7	Solo de baixa plasticidade
7-15	Solo de média plasticidade
>15	Solo de elevada plasticidade

Para realização do ensaio que determina o Limite de Liquidez é utilizado o método “*fall cone test*”. O método referido tem como procedimento experimental a preparação de uma amostra com solo desagregado passado no peneiro nº40. À amostra é adicionada água, homogeneizando-se até ter-se presente uma pasta uniforme. A amostra preparada é colocada num molde, sendo de seguida sujeita ao ensaio de “*fall cone test*” (Figura 3.8), que consiste na medição da penetração efetuada pelo cone padronizado sob condições especificadas de peso, ângulo e tempo de queda para um determinado teor de água. Para que seja possível a obtenção do gráfico são necessários 4 pontos, dois deles abaixo de uma penetração de 20mm e dois deles acima da penetração referida. O valor final do limite de liquidez corresponde à penetração de 20mm, determinado pela equação da reta do gráfico obtido. Para a construção do gráfico toma-se como eixo das abcissas os valores do teor de humidade, e como eixo das ordenadas a profundidade das várias penetrações obtidas.

É possível também avaliar a consistência ou liquidez do solo pela equação 3.5 e perceber o seu significado na Tabela 3.6.

$$IL = \frac{LL - h}{IP} \quad 3.5$$

Onde,

IL - Índice de liquidez (“*Liquidity*”);

h - Teor de humidade natural da amostra [%];

IP - Índice de Plasticidade.

Tabela 3.6 – Significado do índice de liquidez

IL		0	0,25	0,5	1,5	2,0
Consistência	Líquido	Muito Mole	Mole	Pouco Consistente	Consistente	Muito consiste
Problemas	Traficabilidade				Extração e Compactação	



Figura 3.8 - Ensaio LL (Fall cone test)

Para determinação do Limite de Plasticidade (LP) procede-se também à desagregação do solo e à peneiração através do peneiro nº40. Seguidamente é atribuída uma forma esférica para as amostras do solo homogeneizado com um certo teor de humidade. Ao estar formada a esfera, rola-se com a palma da mão a amostra, de modo a criar um filamento com diâmetro aproximadamente com 3mm, voltando-se a dar a forma esférica à amostra e a repetir o procedimento até que se dê a rotura do provete quando o diâmetro se aproxima ao referido. Estes filamentos são recolhidos para determinação do teor de humidade, sendo a média do teor de humidade das respetivas amostras o Limite de Plasticidade. Para efetuar o procedimento referido anteriormente toma-se como auxílio uma placa de vidro, que serve de suporte para o rolamento das esferas de amostra.

3.2.2.5 Proctor

O ensaio Proctor tem como objetivo determinar a relação entre o teor de água e a baridade seca dos solos. Este ensaio pode ser realizado com especificações diferentes, dependendo do tipo de compactação e molde utilizados. Neste caso, o ensaio é realizado com compactação pesada em molde grande, de maneira a garantir a máxima compactação da amostra (Figura 3.9). O procedimento utilizado baseia-se na norma E 197-1966.

Para a realização deste ensaio é necessário desagregar o solo, de maneira cautelosa, de forma a não diminuir as dimensões naturais das partículas. A amostra depois de esquarterada é passada pelo peneiro de 19,0mm. No caso da fração retida ser inferior a 20% é necessário substituir o material retido no peneiro 19,0mm por uma fração de igual massa passado no peneiro de 19,0mm e retido no peneiro nº4, juntando-se essa amostra à fração passada no peneiro de 19,0mm. Considera-se uma amostra no mínimo com 4,5kg e homogeneiza-se a mistura com diferentes tipos de humidade (as humidades adotadas foram de: 6, 8, 10 e 12%) de maneira a obtermos o gráfico curvilíneo que relaciona a baridade seca com o teor de humidade real. A compactação é feita com 55 pancadas (Proctor Modificado) sobre as 5 camadas que formam a totalidade da amostra a compactar. A partir do gráfico obtido, facilmente se observa o valor do teor de humidade ótimo, para qual o solo apresenta um maior nível de compactação.



Figura 3.9 - Ensaio Proctor com compactação pesada em molde grande

3.2.2.6 CBR

O método do ensaio CBR (California Bearing Ratio) baseia-se na determinação da força necessária para que um pistão normalizado penetre no solo até uma certa profundidade, com determinada velocidade. A força é expressa em percentagem, relacionando com a força necessária para o pistão penetrar, até à mesma profundidade, e com a mesma velocidade, um provete normalizado. Para efeitos de cálculo utiliza-se a força necessária para a penetração de 2,5mm e 5mm, sendo considerada a força mais elevada das duas

penetrações referidas. O procedimento necessário para a realização do ensaio rege-se pela norma E 198-1967. Este ensaio permite avaliar em termos mecânicos a resistência da amostra a ser ensaiada.

Inicialmente deve-se repetir o procedimento do ensaio Proctor, mas neste caso para um teor de humidade ótimo já calculado (garantindo assim uma maior compactação e baridade seca). Utiliza-se novamente o método de compactação pesada em molde grande. Após a amostra estar compactada, deve ser colocada em embebição durante 96 horas, mantendo-se constante o nível da água. Após as 96h de embebição e do cálculo da expansão segue-se o ensaio de penetração CBR (Figura 3.10).

Utilizou-se um anel de carga de 10kN e também de 50kN nos casos em que a amostra oferece uma resistência maior do que o anel pode suportar, havendo limites estabelecidos da deformação, à qual o anel pode estar sujeito, que por um motivo de segurança do equipamento, não podem ser ultrapassados.



Figura 3.10 - Ensaio CBR

3.2.2.7 Massa volúmica aparente

O ensaio de determinação da Massa Volúmica, com base na norma LNEC E 35: 1956, é realizado com o intuito de determinar a massa volúmica do solo de fundação, resíduos e misturas, de maneira a entender as mudanças que ocorrem com a alteração dos componentes de cada amostra. Para determinação da massa é feita a pesagem do provete depois de este estar seco. Por outro lado o volume é determinado pelo peso de volume de água, deslocado pelas partículas secas num picnómetro de volume conhecido (Figura 3.11).

Para obter o resultado da massa volúmica é necessário efetuar o cálculo traduzido pela equação 3.6.

$$\rho = \frac{(M_3 - M_1)}{[(M_3 - M_1) - (M_4 - M_2)]} \quad 3.6$$

Onde,

ρ – Massa volúmica [g/cm^3];

M1 - Massa do picnómetro e funil [g];

M2 - Massa do picnómetro, funil e água [g];

M3 - Massa do picnómetro, funil, e amostra seca [g];

M4 - Massa do picnómetro, funil, amostra saturada e água [g].

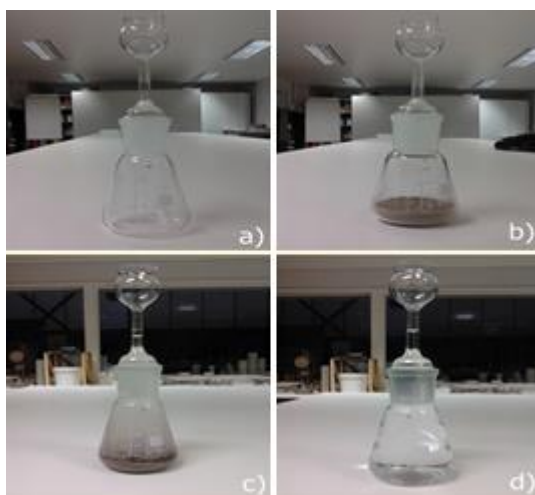


Figura 3.11 - Determinação da massa volúmica pelo método do picnómetro a) – representação do M1, b) – representação do M2, c) – representação do M3, d) – representação do M4

3.2.2.8 *Análise mineralógica*

Procedeu-se à determinação das fases cristalinas presentes nas amostras SF (solo de fundação), CF (cinzas de fundo), CV (cinzas volantes), M1 (mistura 1), M2 (mistura 2) e M3 (mistura 3) por difração de raio-X (DRX). Para a preparação das amostras recorreu-se a uma moagem manual com almofariz e pilão de maneira às amostras ficarem em pó. Para garantir uma moagem indicada para a realização do ensaio recorreu-se ainda ao uso de um moinho automático (Figura 3.12). Para a realização do ensaio utilizou-se um difractor *Rigaku “Geigerflex” D/max-Série C*, com recurso a radiação $K\alpha$ de um eléctrodo de cobre

(Cu) monocromatizada por filtro de níquel (Ni). Com a realização deste ensaio é possível verificar, a um nível mais rigoroso, os constituintes dos materiais utilizados neste estudo, verificando possíveis compatibilidades entre o solo e resíduos a nível mineralógico.



Figura 3.12 - Obtenção das amostras para determinação de fases cristalinas

3.2.2.9 *Análise química*

Para análise química utiliza-se a técnica de espectrometria por fluorescência de raio-X (FRX), indicada para determinação de óxidos e elementos metálicos em amostras sólidas. Este ensaio é realizado nas amostras de SF (solo de fundação), CF (cinzas de fundo) e CV (cinzas volantes).

As amostras são preparadas primeiramente de maneira similar ao ensaio DRX, sendo estas moídas até ficarem em pó com recurso a almofariz e pilão, no entanto, devido a ser requerido um nível de fineza superior, utiliza-se também um moinho de discos. Prepara-se cerca de 10g de cada amostra (Figura 3.13), que são prensadas a frio na forma de pastilhas, sendo de seguida utilizado um espectrómetro (Panalytical Axios Spectrometer) por radiação $RhK\alpha$. Os resultados são apresentados em percentagem de óxidos.



Figura 3.13 - Amostras para análise química

3.2.2.10 Análise do comportamento térmico dos resíduos

Este tipo de análise trata-se do estudo do comportamento térmico dos resíduos utilizados neste estudo (cinzas de fundo e cinzas volantes), através de análise térmica gravimétrica (ATG) e análise térmica diferencial (ATD). A termogravimetria consiste na medição de variações de massa da amostra em função da temperatura, quando esta é sujeita a um ciclo de aquecimento ou arrefecimento controlado. A análise térmica diferencial mede a variação de energia do sistema quando ocorrem mudanças de fase, durante o processo térmico. Os dados utilizados no presente trabalho são referentes ao estudo de Modolo et al. (2014), uma vez que se trata do mesmo material.

3.2.2.11 Quantificação de cloretos

Para a realização do ensaio de quantificação de cloretos utiliza-se a norma EN 1015-17:2000. O objetivo prioritário deste ensaio passa pela determinação da concentração de cloretos solúveis presentes nas diferentes amostras, avaliando a nível ambiental a potencialidade da aplicação de resíduos no solo.

Na realização deste ensaio é necessária uma agitação constante da amostra durante 60min e o repouso da amostra durante 24h (Figura 3.14).



Figura 3.14 - Ensaio de quantificação de cloretos – Amostras antes e durante a filtração

A partir do eluado obtido após sucessivas filtrações realizou-se a leitura dos cloretos através de um analisador multi-parâmetros para pH, mV, Condutividade, TDS e Temperatura, marca CONSORT, modelo C860 e também um eletrodo combinado de íons específicos de cloreto, marca HANNA instruments modelo HI 4107 (Figura 3.15).



Figura 3.15 - Ensaio de quantificação de cloretos - pipetagem e equipamento utilizado

3.2.3 Ensaio de campo

O objetivo deste ensaio é perceber e avaliar o comportamento das cinzas de fundo, aplicadas diretamente à superfície do solo, estando estas sujeitas a condições atmosféricas diversas, a compactação natural e ainda sujeitas ao fator tempo. A experiência resume-se em geral a uma observação visual do comportamento do resíduo; os ensaios mecânicos são realizados em laboratório, a partir de amostras recolhidas no local da experiência de campo e com amostras recolhidas da simulação laboratorial.

Após a caracterização do solo e resíduos utilizados neste estudo, procedeu-se a uma experiência de campo num terreno cedido pelo grupo Portucel/Soporcel. O terreno é

dividido em 4 partes (cada uma formando um quadrado com cerca de 25m²), aplicando-se em cada uma das partes uma quantidade diferente de cinzas de fundo. Deve-se ter em conta que se procedeu apenas ao depósito superficial deste resíduo visto ser prioritária a sua valorização face aos milhares de toneladas geradas por ano, existindo também a possibilidade de complementar o estudo com a adição de uma mistura de cinzas de fundo com cinzas volantes na simulação.

De maneira a obter-se uma possível comparação, optou-se por distribuir de forma desigual as cinzas de fundo. Na Figura 3.16 pode-se observar que os terrenos 3 e 4 contêm cerca de 20cm de resíduo. A semelhança da espessura de resíduo utilizado deve-se ao facto do terreno 4 possuir uma camada de *tout-venant*, enquanto o terreno 3 é desprovido dessa camada, sendo possível avaliar se os terrenos respondem de uma forma dissemelhante quando a sua constituição é diferente.

O terreno 1 é subdividido em duas partes: uma com um valor aproximado de 15cm de espessura em resíduo, outra com 30cm do mesmo resíduo. O terreno 2 é desprovido de qualquer resíduo, sendo este o local de referência onde é extraída a amostra “REF”, anteriormente referida.

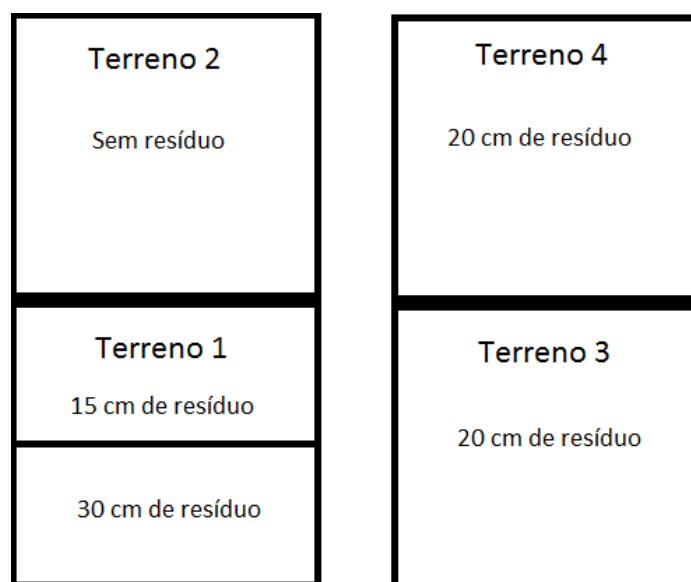


Figura 3.16 - Divisão do terreno (experiência de campo)

O resíduo aplicado é gerado na CTB e são utilizadas cinzas de fundo, geradas nas mesmas operações de fornalha, em todos os terrenos. A aplicação do resíduo procedeu-se com

recurso a escavadoras BOBCAT, tendo sido a camada superficial alisada manualmente com recurso a pás (Figura 3.17).

Após a aplicação do resíduo nos vários terrenos não foi efetuada qualquer tipo de compactação nem alteração antrópica. A camada de resíduos apenas teve como fatores de alteração, as condições atmosféricas e a compactação natural adquirida ao longo do tempo.



Figura 3.17 - a) – Cinzas de fundo utilizadas; b) – Remoção da camada de tout-venant; c) – Aplicação do resíduo; d) – Espalhamento e alisamento da camada de cinzas; e) – Vista do terreno 4 e 3 (da esquerda para a direita); f) - Vista do terreno 1.

3.2.4 Simulação laboratorial

O procedimento experimental que será apresentado neste ponto foi efetuado havendo o desígnio de, num ambiente controlado, verificar a diferença de comportamento de 3 tipos de misturas com resíduos aplicados à superfície de um solo de fundação. O solo e resíduos usados são os mesmos utilizados no ensaio de campo, realizado na unidade fabril da Portucel/Soporcel. Paralelamente a esta simulação foi realizada a experiência de campo.

Prepararam-se os 3 recipientes com a constituição representada na Tabela 3.7.

Os recipientes foram concretizados da mesma forma: adicionou-se a camada de brita, de seguida o solo de fundação com uma compactação de 20 pancadas (recorrendo-se a um

pilão), a cada 5cm, e por último foi adicionada a mistura de resíduo, sendo também efetuada a mesma compactação, finalizando-se com o alisamento da superfície (Figura 3.18). As misturas de resíduo utilizadas nesta simulação dizem respeito, a nível composicional, aos dados referidos na Tabela 3.2.

Tabela 3.7 - Constituição dos recipientes (simulação)

Constituição	Recipiente		
	1	2	3
Brita (kg)	4	4	4
Altura (cm)	4	4	4
SF (kg)	15	15	15
Altura (cm)	10	10	10
Mistura 1 (kg)	39	—	—
Altura (cm)	20	—	—
Mistura 2 (kg)	—	28,2	—
Altura (cm)	—	20	—
Mistura 3 (kg)	—	—	41
Altura (cm)	—	—	20
Peso total (kg)	58	47,2	60
Altura total (cm)	34	34	34

Note-se que todos os componentes utilizados nos recipientes não sofrem nenhuma alteração em relação ao estado natural, existindo um teor de humidade presente no próprio solo, que acaba por contribuir para uma saturação mais rápida com a adição de água. Por outro lado, utiliza-se também material que é naturalmente seco (cinzas volantes, cinzas de fundo e cal hidráulica).



Figura 3.18 - Montagem das caixas para a simulação

Como base de suporte às 3 caixas foram colocados tabuleiros com uma ligeira inclinação de maneira a ser possível o fácil escoamento por gravidade da água, que posteriormente é recolhida, havendo a possibilidade de uma contagem da água absorvida e escoada em cada recipiente.

No tabuleiro que funciona como base fez-se apenas um só furo, com diâmetro 2mm de forma a evitar a passagem de finos. Nos recipientes foram feitos 6 furos com um diâmetro ligeiramente superior (2,5mm) de maneira a não ser simples a sua obstrução. A recolha da água foi efetuada com auxílio a bidões de 5 litros (Figura 3.19).



Figura 3.19 - Pormenor do furo e recuperação da água de lavagem da simulação (Recipiente, tabuleiro e solução de recolha de água – da esquerda para a direita)

3.2.4.1 Molhagem dos recipientes

Este ensaio não normativo é realizado com o objetivo de entender as alterações que a hidratação do material impõe em cada recipiente. Simulando a precipitação que ocorre sobre um pavimento e a consequente água absorvida pela fundação.



Figura 3.20 - Molhagem do recipiente nº3

Para a molhagem dos recipientes utilizou-se água destilada, evitando substâncias dissolvidas, para ser possível a realização do ensaio de quantificação de cloretos (Figura 3.20). Foram realizadas duas molhagens ao longo de todo o processo, com um intervalo temporal de um mês.

3.2.4.2 Ensaio à penetração

Após efetuado o processo de molhagem dos recipientes espera-se pela secagem parcial (superficial) dos resíduos, quando finalizada a fase de modificação das amostras, devido à hidratação imposta pela molhagem, realizou-se o ensaio de penetração, para avaliar se a hidratação impeliu alguma consistência aos recipientes. Os resultados deste ensaio são discutidos com base da penetração (em cm) que o pilão conseguiu atingir em cada um dos recipientes. O ensaio foi realizado um mês após a primeira molhagem.

Com o solo superficialmente seco foi feito um ensaio não normativo, cujo conceito envolve o lançamento de um pilão metálico com 4,7kg a uma altura de 1m. Para servir de suporte ao lançamento utiliza-se um tubo de PVC (Figura 3.21). Optou-se por este método não normativo devido a não ser possível a recolha de valores significativos com o ensaio do Esclerómetro no topo dos recipientes.



Figura 3.21 - Ensaio à penetração (recipiente 3)

Calculando a força aplicada pela queda do pilão é possível obter, de forma aproximada, a pressão aplicada à superfície do recipiente.

Considerou-se a equação 3.7:

$$F = m \times a \quad 3.7$$

Onde,

F - Força [N];

m - Massa [kg];

a - Aceleração da gravidade [m/s²].

A pressão que o pilão metálico incide sobre a superfície do recipiente é obtida através da equação 3.8.

$$T = \frac{F}{A} \quad 3.8$$

Onde,

P – Pressão [Pa]

F – Força [N]

A – Área [m²]

3.2.4.3 Desmontagem dos recipientes e recolha de amostras.

Na tentativa de recolher amostras da mistura de resíduo, presente em cada um dos recipientes, procedeu-se à desmontagem dos mesmos. Optou-se por uma viragem dos recipientes, libertando toda a sua constituição num plástico. As misturas que apresentam consistência suficiente estão dentro dos requisitos para serem levadas à máquina de corte, tornando possível a recolha de amostras (Figura 3.22).

Depois da recolha de amostras ter sido efetuado realizou-se o ensaio não destrutivo de ultra-sons e ainda ensaios à flexão e compressão, finalizando-se com ensaios baseados no Princípio de Arquimedes. Na Figura 3.23 é possível observar algumas das amostras recolhidas, em forma de prisma (para ensaios de resistência à flexão e compressão) e em forma cúbica (para ensaios de resistência à compressão).



Figura 3.22 - a) – Remoção do recipiente de plástico; b) – Amostra sem recipiente; c) – Alisamento da superfície de contacto resíduo-solo; d) – Amostra final, antes de ser levada a corte para recolha das amostras a ensaiar.

Os cubos têm uma aresta aproximadamente de 10cm e os prismas as dimensões aproximadas de 4x4x16cm.



Figura 3.23 - Exemplo de amostras recolhidas do recipiente 2

3.2.4.4 Esclerometro

Este ensaio foi realizado nos recipientes 2 e 3 visto serem os únicos a apresentarem consistência suficiente para o ensaio ser realizado. O procedimento deste ensaio baseia-se no posicionamento do esclerometro perpendicularmente à superfície a ser ensaiada, encostando-o e pressionando-o. Através de um mecanismo interno, o aparelho dispara uma mola contra a haste metálica, criando o impacto no material a ensaiar. Quanto maior a resposta desse impacto, mais resistente é o material. O ensaio foi realizado na parte superior e lateral dos recipientes 2 e 3.



Figura 3.24 - Ensaio Esclerometro

3.2.4.5 Resistência à flexão

Este ensaio foi realizado nos provetes recolhidos da desmontagem dos recipientes, com recurso à máquina universal de ensaios (SHIMADZU: AG-IC 100kN) com uma célula de

5kN (Figura 3.25). O provete prismático foi colocado no suporte da máquina e centrado perpendicularmente à célula de carga, sujeito a uma força gradualmente aplicada na sua superfície até à rotura. O valor final de resistência máxima à flexão é expresso em MPa.

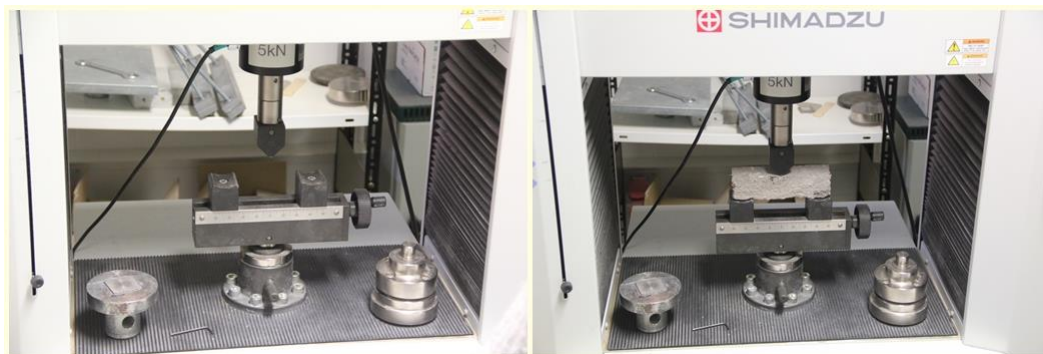


Figura 3.25 - Ensaio de resistência à flexão (SHIMADZU: AG-IC 100kN)

3.2.4.6 Resistência à compressão

O ensaio à compressão foi realizado com metade do provete resultante do ensaio à flexão e com provetes cúbicos retirados também dos recipientes que possuíam consistência para tal. Tal como o ensaio à flexão, foi utilizada a máquina de ensaios universal (SHIMADZU: AG-IC 100kN) com célula de carga de 5kN (Figura 3.26). Centrou-se a metade do provete entre os suportes, ao qual foi aplicada uma força gradual até ser atingida a rotura. O valor final da resistência máxima à compressão é expresso em MPa.

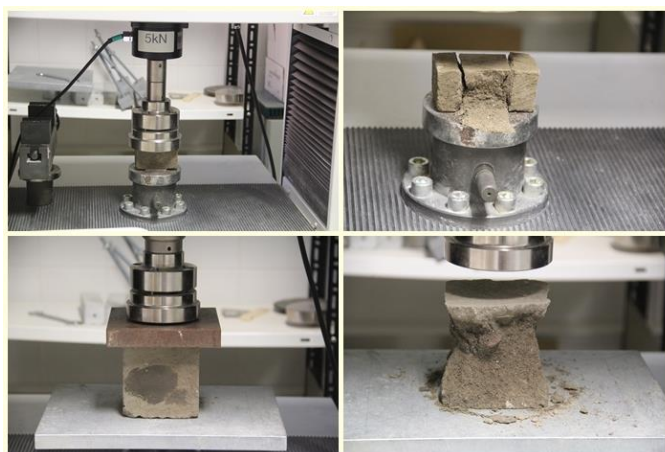


Figura 3.26 - Ensaio de resistência à compressão (SHIMADZU: AG-IC 100 kN)

3.2.4.7 Avaliação do módulo de elasticidade pelo PUNDIT (ultra-sons)

Esta técnica pode ser utilizada na avaliação do comportamento mecânico dos materiais e o ensaio foi efetuado com base no documento lançado pela empresa CNSFARNELL (2004). Este comportamento pode ser avaliado através do resultado da velocidade de propagação das ondas elásticas, resultantes do impulso ultrassónico percorrido entre dois pontos utilizando o equipamento PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital*), apresentado na Figura 3.27.



Figura 3.27 - Ensaio de ultra-sons com o aparelho PUNDIT

Observa-se que quando mais denso for o material, mais rapidamente se propagam as ondas, devido ao facto de as ondas se propagarem por vibração das partículas sólidas constituintes do material, podendo avaliar o seu desempenho segundo esse tempo de propagação, indicando possíveis fissuras, zonas ocas, fendas entre outras imperfeições no material.

Este ensaio consiste em colocar dois transdutores em faces opostas do provete a ensaiar e, com recurso ao aparelho, é possível visualizar o resultado que traduz o tempo que uma onda demora a percorrer a distância entre os dois transdutores. O ensaio é realizado após a calibração com a ajuda de uma barra de calibração com um tempo de propagação conhecido.

Após ser conhecido o valor retirado a partir do ensaio (tempo de propagação das ondas) utiliza-se a equação 3.9.

$$V = \frac{L}{t} \quad 3.9$$

Onde,

V – velocidade de propagação das ondas [km/s];

L – comprimento do percurso (aresta da provete) [mm];

t – tempo de propagação de ondas registado no dispositivo [μ s].

Conhecidos os valores da velocidade de propagação, em km/s utiliza-se a equação 3.10 para estimar os módulos de elasticidade dinâmicos. Este procedimento é retirado do manual técnico do ensaio (Farnell, 2004).

$$E_d = y \cdot v^2 \cdot \frac{(1 + \delta) \cdot (1 - 2\delta)}{1 - \delta} \quad 3.10$$

Onde,

E_d – Módulo de elasticidade dinâmico [MN/m^2];

v – Velocidade [km/s];

y – Densidade real [kg/m^3];

δ – Rácio dinâmico de Poisson = 0.

3.2.4.8 *Massa específica*

Para a realização deste ensaio é utilizado o princípio de Arquimedes e os cálculos foram realizados com base na norma ISSO/TS 17892-3, recorrendo-se a 3 pesagens. A primeira pesagem é efetuada com a amostra seca em estufa, a temperatura de 105°C. A segunda pesagem é efetuada com imersão em água. A terceira pesagem é efetuada com a amostra completamente saturada em água. Com base nestas 3 pesagens é possível calcular a massa específica, empregando-se a equação 3.11.

$$\rho = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad 3.11$$

Onde,

ρ – Massa volúmica [g/cm^3];

m_s – Massa da amostra seca [g];

m_{sat} – Massa da amostra saturada em água [g];

m_i – Massa da amostra imersa em água [g].

3.2.4.9 Absorção de água

Utilizando a norma NP EN 1097-6 entende-se como absorção de água por imersão a diferença entre uma massa de um provete imerso em água e a massa do mesmo provete quando seco, expressa percentagem de massa seca.

O ensaio passa inicialmente pela saturação dos provetes, de maneira a atingirem uma massa constante, registando-se esses mesmos valores (m_1). Seguidamente são efetuadas as pesagens dos provetes em imersão em água (m_2) e finalmente regista-se os valores dos mesmos provetes completamente secos (m_3). Finalmente os valores de absorção de água por emersão são calculados através da equação 3.12.

$$A_i = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad 3.12$$

Onde,

A_i – Absorção de água por imersão [%]

m_{sat} – Massa do provete saturado [g];

m_s – Massa do provete seco [g].

3.2.4.10 Porosidade aberta

A porosidade é uma propriedade que caracteriza os espaços vazios que se encontram na amostra. Com o ensaio de porosidade aberta é possível avaliar para cada amostra, a sua percentagem de poros abertos (espaços em contacto com o exterior).

Utilizou-se o princípio de Arquimedes para a realização deste ensaio, do qual resulta a expressão 3.13 para o cálculo da percentagem de poros abertos.

$$\Phi = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad 3.13$$

Onde,

Φ – Porosidade aberta [%]

m_{sat} – Massa do provete saturado ao ar [g];

m_s – Massa do provete seco [g].

m_i – Massa imersa do provete saturado [g].

CAPÍTULO 4

Discussão de Resultados

Caracterização Geral

Ensaio de Campo

Simulação Laboratorial

4 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 Caracterização Geral

4.1.1 Caracterização física

A Tabela 4.1 apresenta os valores relativos à medição do teor de humidade das amostras (de solo e resíduos) recolhidas para toda a atividade experimental, incluindo também a cal hidráulica utilizada na 3.

Tabela 4.1 - Valores do Teor de Humidade

Amostra	Teor de Humidade (%)
SBA	10,9
REF	10,5
SF	11,8
CF	<1
CV	<1
CH	<1

Analisando a tabela é possível verificar um valor mais elevado do teor de humidade da amostra SF (solo de fundação). Este fenómeno é explicado pela recolha da amostra ter sido efetuada a uma maior profundidade, pois o teor de humidade de um solo aumenta com a profundidade e variação da estação do ano. Considerando que as amostras foram recolhidas a pouca profundidade (máximo de 35cm), os teores de humidade obtidos são aceitáveis, justificando-se alguma variação.

Da Figura 4.1 à Figura 4.3 está representada a distribuição granulométrica do solo utilizado no âmbito do trabalho experimental desta dissertação. A Figura 4.1 diz respeito à distribuição granulométrica do solo REF (referência) que apenas foi escavado para recolha de amostra; a Figura 4.2 diz respeito à distribuição granulométrica do solo SBA (solo bottom ashes) ao qual foi adicionada uma camada superficial de cinzas de fundo no decorrer da experiência de campo e finalmente, a Figura 4.3 diz respeito à distribuição granulométrica do solo SF (solo de fundação), tratando-se de uma amostra recolhida a maior profundidade de solo. Foram recolhidas e analisadas estas 3 amostras de solo para

efeitos de comparação de análise granulométrica, evitando incertezas quando à sua classificação.

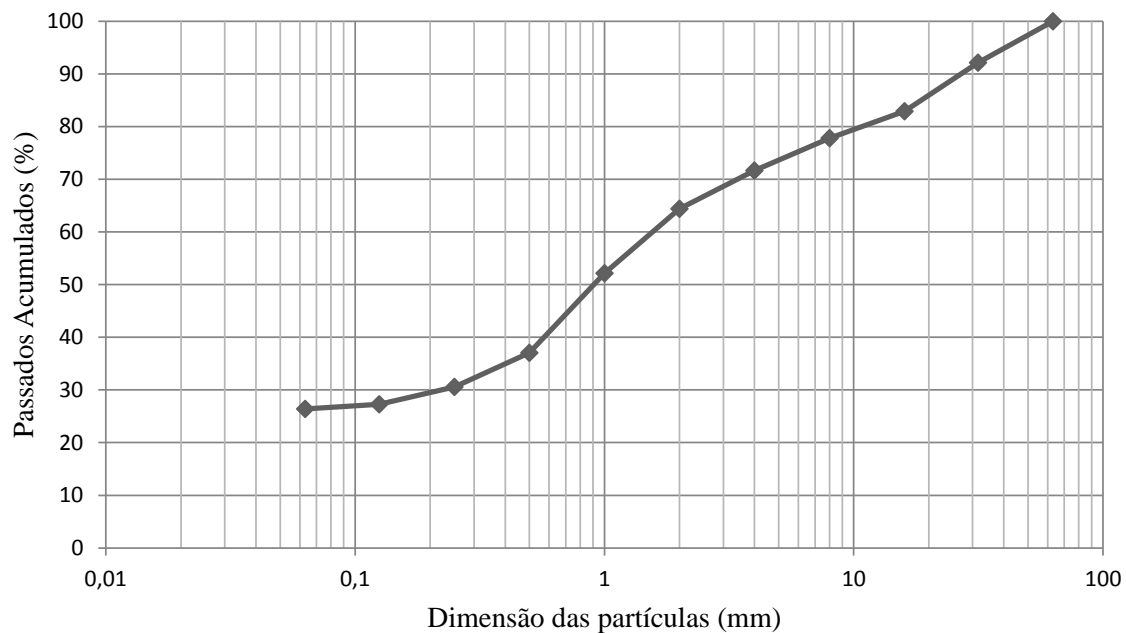


Figura 4.1 - Distribuição granulométrica da amostra REF

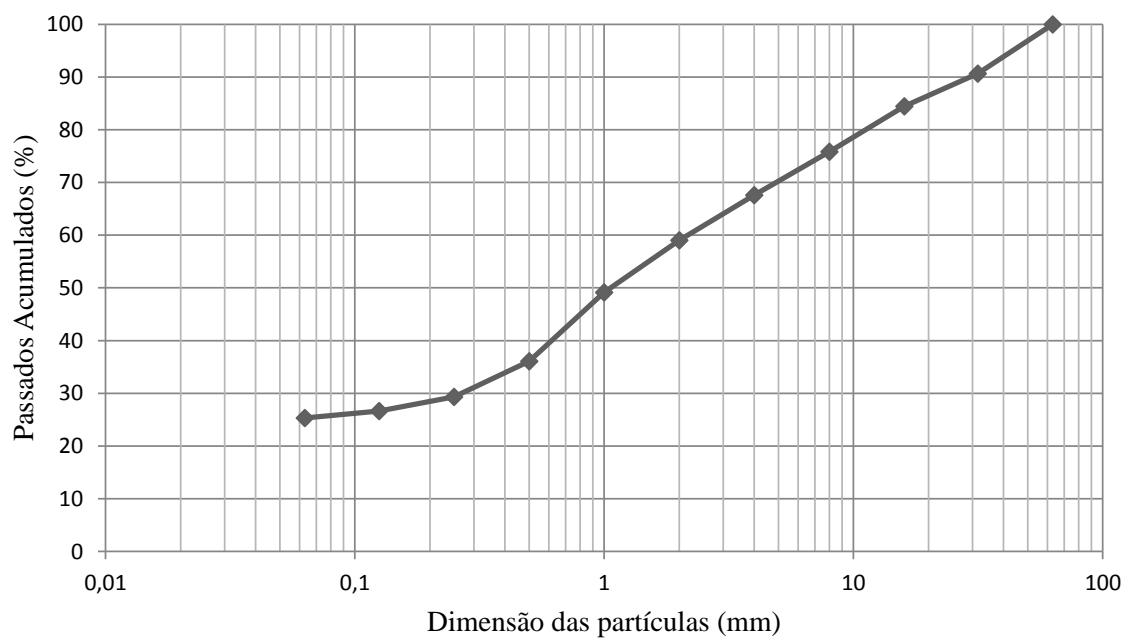


Figura 4.2 - Distribuição granulométrica da amostra SBA

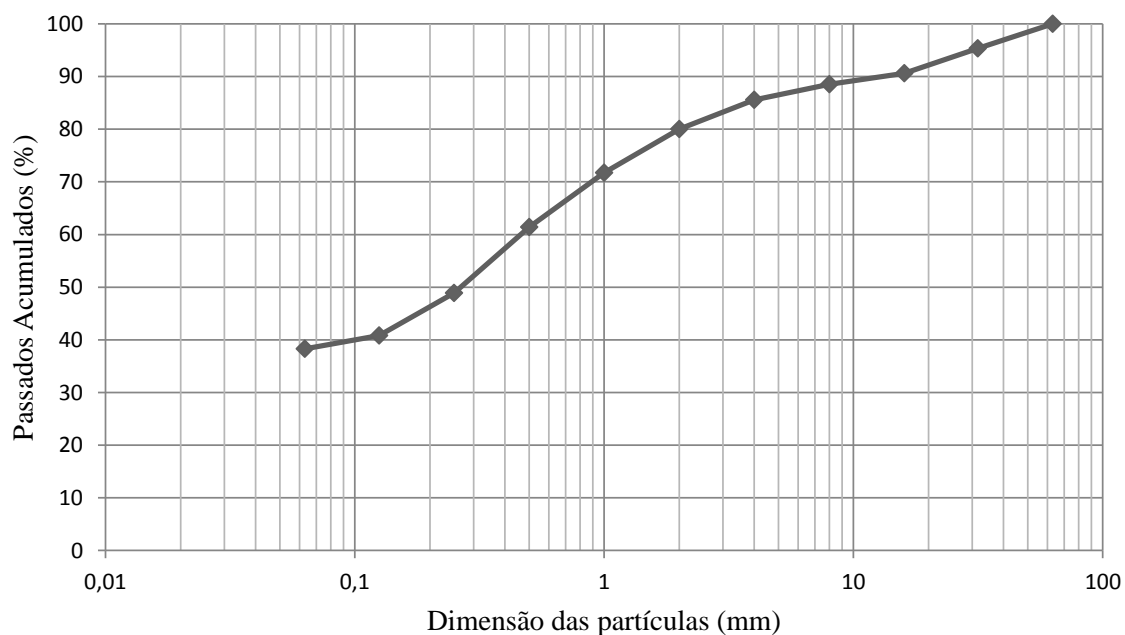


Figura 4.3 - Distribuição granulométrica da amostra SF

No caso da Figura 4.1 e Figura 4.2 é possível visualizar muitas semelhanças a nível da distribuição granulométrica. Comportamento previsto de obter, considerando que as amostras são de localizações diferentes, no entanto representativas do mesmo solo. Observando a análise granulométrica do Solo de Fundação (Figura 4.3), verifica-se que se obtém um solo com um maior número de finos, justificado pela remoção da camada de *tout-venant*, e de uma escavação mais profunda do solo, tendo sido removido o material grosseiro através da escavação, aumentando desta forma cerca de 12,6% a percentagem de finos passados no peneiro de 63mm, quando comparado com uma média ponderada de finos passados pelo mesmo peneiro relativamente à amostra REF e SBA.

As distribuições granulométricas anteriormente referidas podem classificar-se como contínuas, com uma distribuição uniforme dos grãos, formando possíveis compatibilidades quando aplicados resíduos em junção aos solos com distribuições granulométricas semelhantes, sendo ocupado uma quantidade significativa de vazios presentes no solo, melhorando o empacotamento dos componentes.

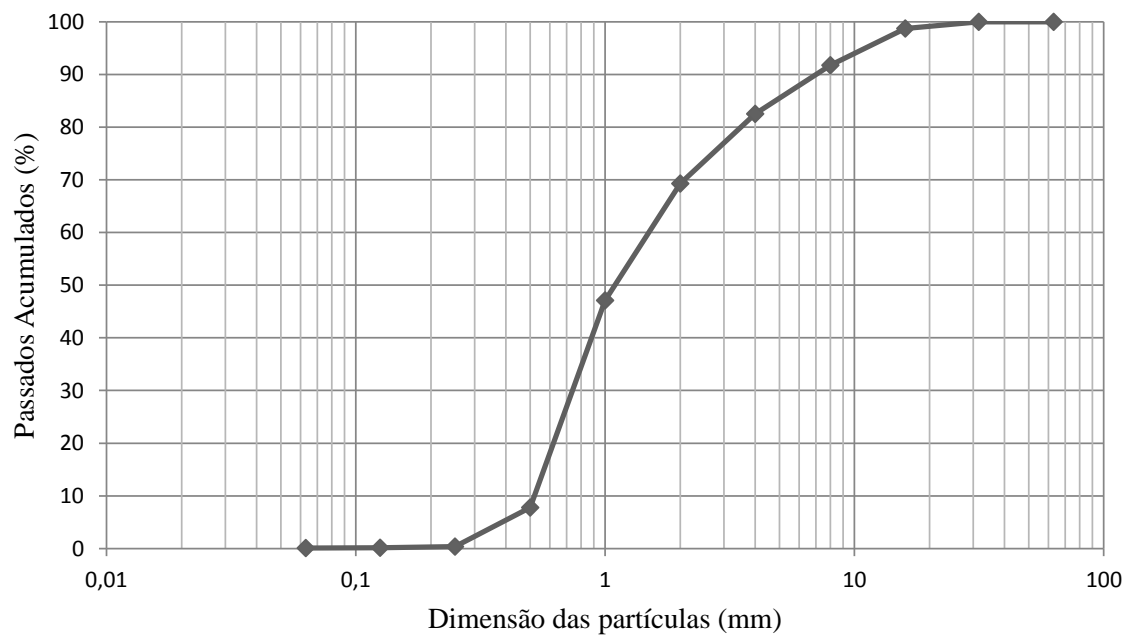
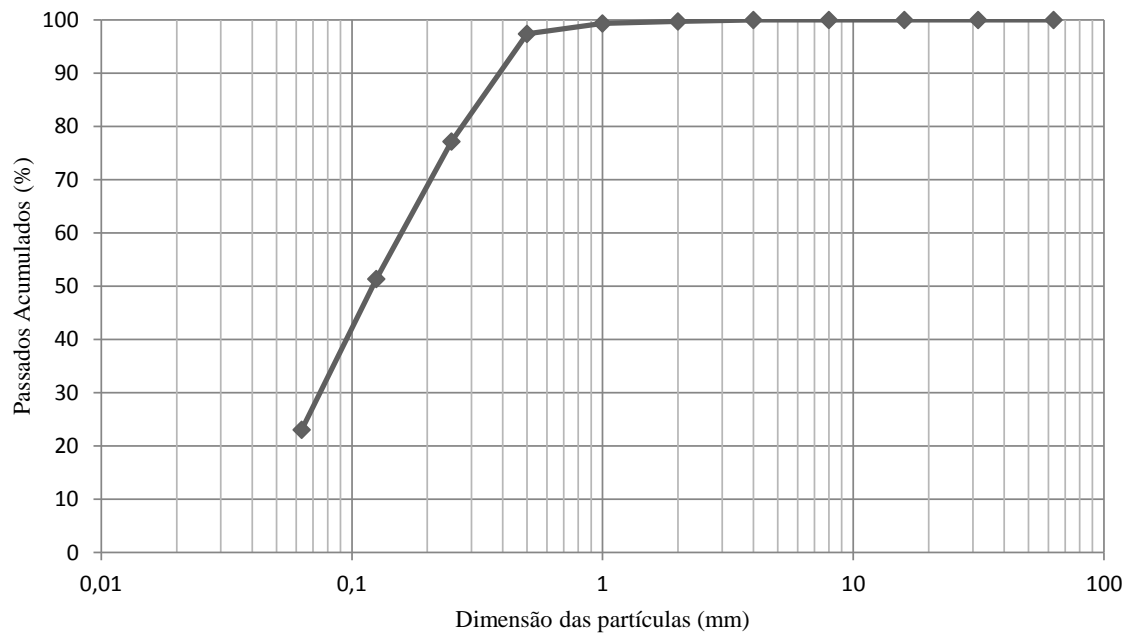
Para se efetuar a classificação das amostras optou-se por utilizar dois sistemas distintos: a classificação unificada e a classificação para fins rodoviários, de maneira a ser possível classificar o solo globalmente.

Quanto à classificação unificada (ASTM D 2487-85) referente ao Solo de Fundação, é possível classificar o solo como um solo Grosso, considerando que menos 50% do material fica retido no peneiro de 0,075mm; solo também qualificado como Areia (mais de 50% da fração grossa passada no peneiro nº4). Devido à quantidade de finos (mais de 12%) é possível classificar também este solo como uma areia fina, e por fim, cruzando todas as informações obtidas com a curva granulométrica, determina-se o solo como sendo do grupo SC-SM, Areia Silto-Argilosa com cascalho.

Relativamente à classificação do Solo de Fundação para fins rodoviários, distingue-se primeiro a classificação geral do solo. Tratando-se de um solo com mais de 35% de material passado no peneiro nº200, este pertence ao grupo dos Materiais Siltosos e Argilosos. Considerando um LL de 29% e um LP de 21.2%, obtém-se um Índice de Plasticidade (IP) de 7.8% (valores calculados através do ensaio dos Limites de Atterberg), insere-se dentro do grupo A-4, cujo material predominante são solos siltosos, resultando um comportamento geral como subleito de regular a mau.

Classificando a amostra REF e SBA obtém-se a mesma classificação unificada que a amostra SF, no entanto, utilizando a classificação para fins rodoviários é possível encontrar algumas diferenças. Primeiramente, enquanto classificação geral, o solo é identificado como constituído por materiais granulares (35% ou menos passando pelo peneiro nº200). Considerando a percentagem de material, que passa no peneiro nº200, ser inferior a 35%, assim como valores assumidos de 23% e 25% (L.L para REF e SBA respetivamente) e valores de 18.8% e 18.2% (LP para REF e SBA respetivamente), obtém-se IP's de 6.7% e 7.8% (REF e SBA respetivamente), a amostra encontra-se dentro do grupo A-2-4 tendo como materiais predominantes a areia e areia siltosa ou argilosa, classificando-se em relação ao comportamento geral como subleito de excelente a bom.

A distribuição granulométrica da amostra CF (cinzas de fundo) é apresentada na Figura 4.4, a Figura 4.5 apresenta a distribuição granulométrica da amostra CV (cinzas volantes) e por último a Figura 4.6 apresenta a distribuição granulométrica da CH (cal hidráulica utilizada na mistura 3 para efeito de ligante).

**Figura 4.4** - Distribuição granulométrica da amostra CF**Figura 4.5** - Distribuição granulométrica da amostra CV

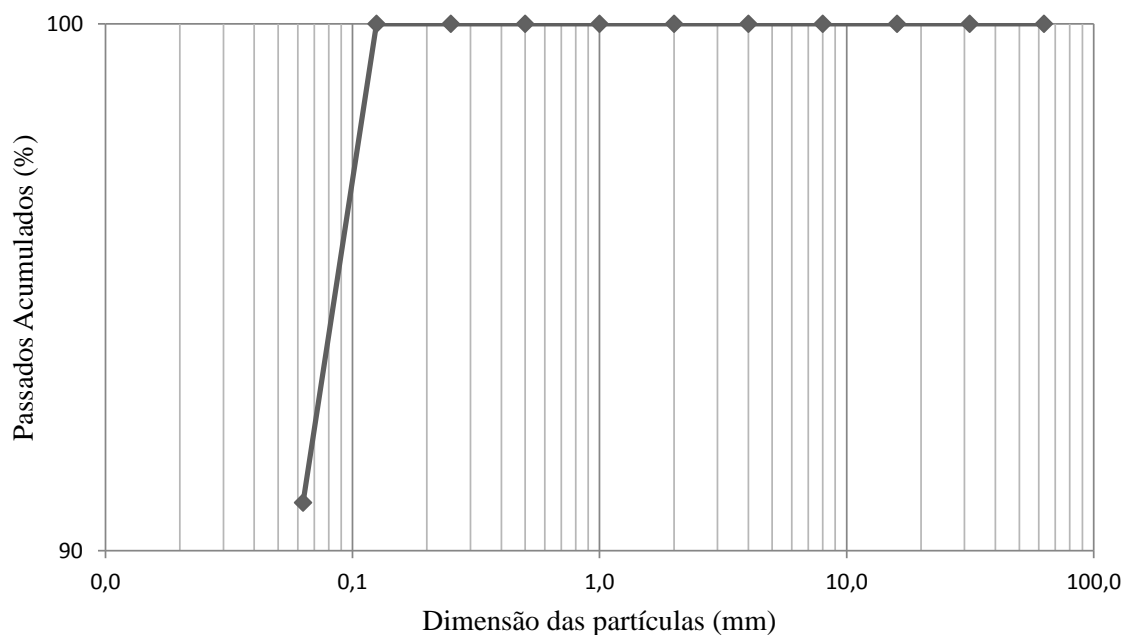
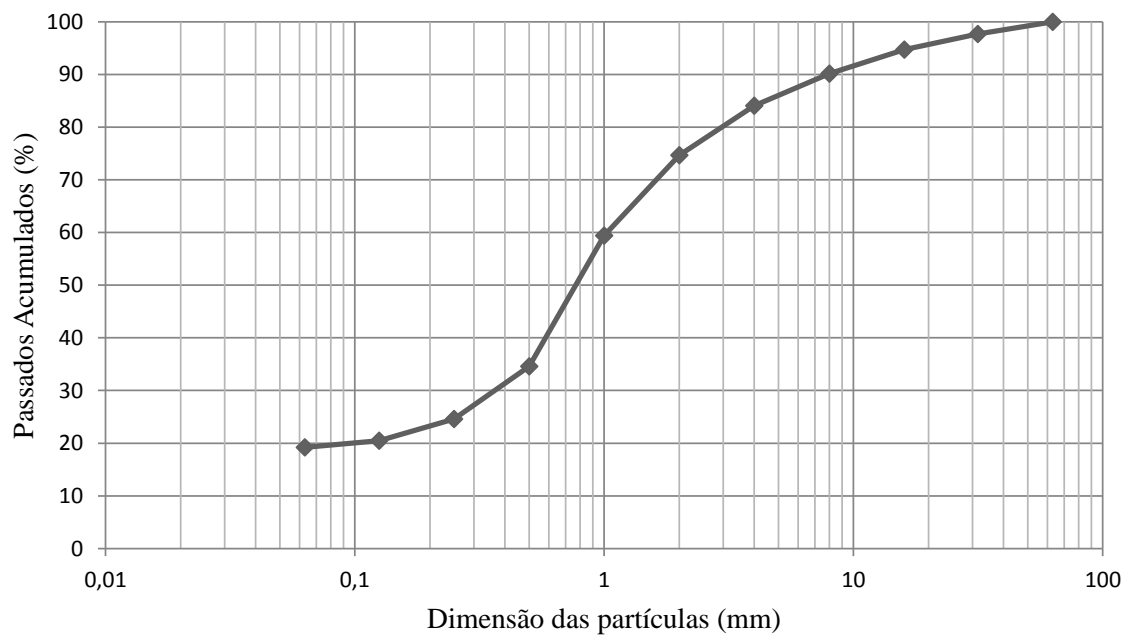
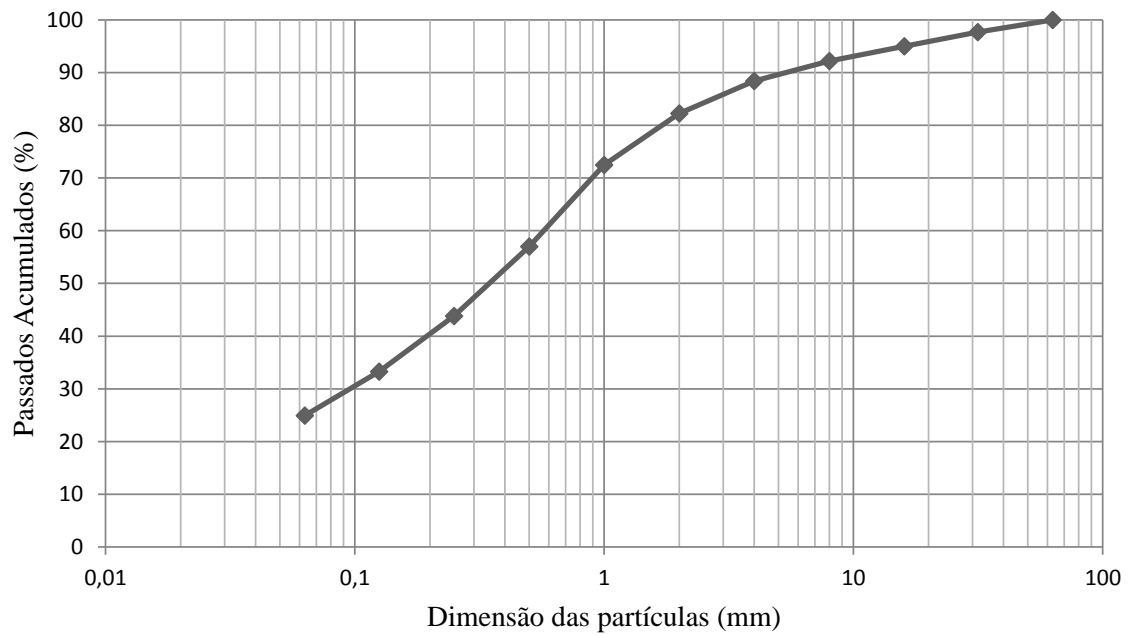


Figura 4.6 - Distribuição granulométrica da amostra CH

Relativamente à Figura 4.4 observa-se uma amostra com uma distribuição granulométrica contínua, no entanto com uma menor percentagem de finos, comparando com as amostras REF, SBA e SF, não existindo uma percentagem significativa de finos passados no peneiro de 0,063mm, comparando com as outras amostras em questão. Esta amostra apresenta uma maior concentração de material retido nos peneiros 1 e 2mm.

A Figura 4.5 representa uma distribuição granulométrica mais concentrada entre o peneiro de 0,250mm e o fundo, sendo uma amostra que apresenta material mais fino, distinguindo-se das outras amostras em questão por este motivo, contendo, o seu material, uma maior superfície específica.

A Figura 4.7, Figura 4.8 e Figura 4.9 são representativas da distribuição granulométrica das misturas realizadas.

**Figura 4.7** - Distribuição granulométrica da amostra M1**Figura 4.8** - Distribuição granulométrica da amostra M2

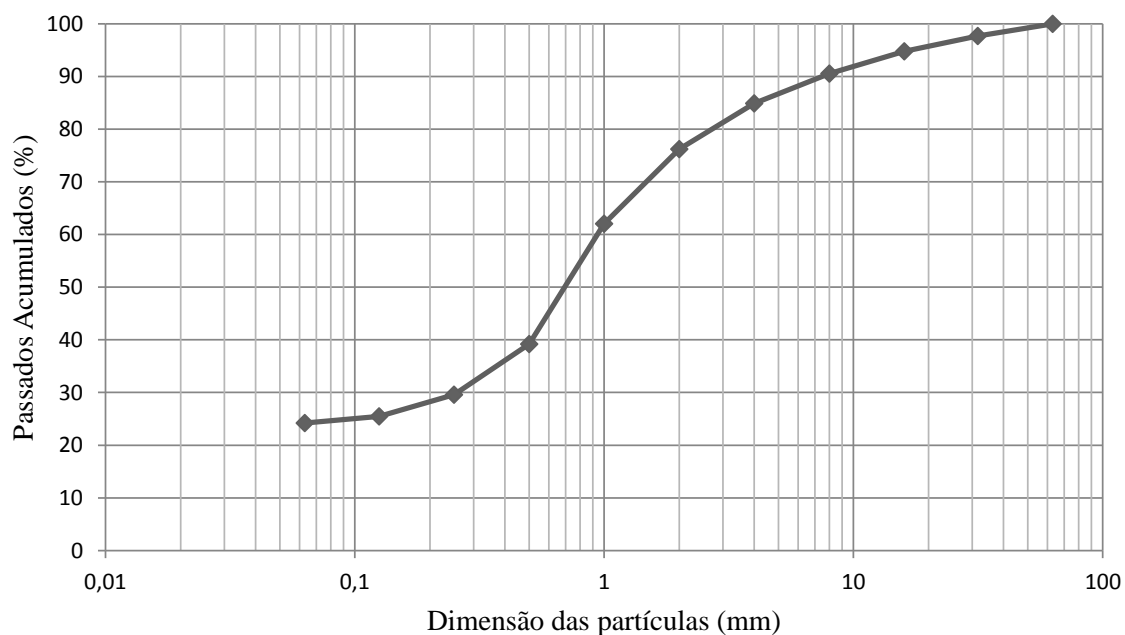


Figura 4.9 - Distribuição granulométrica da amostra M3

Todas as distribuições granulométricas das misturas podem ser classificadas como contínuas com curvas suaves. A curva granulométrica da M1 é muito semelhante à curva granulométrica da M3, um facto esperado visto haver apenas uma variação de 5%, com a adição da cal hidráulica, face à composição total. A curva granulométrica da mistura 2 é a que mais se assemelha à curva granulométrica do solo de fundação. Este caso deve-se à mistura 2 conter tanto cinzas de fundo como cinzas volantes, acabando por equilibrar a relação entre material mais fino e grosseiro, criando uma mistura semelhante ao próprio solo de fundação em termos físicos. Todas as misturas apresentam uma menor quantidade de material passado no peneiro 0,063mm em relação à amostra de solo de fundação, significando que com a adição dos resíduos diminuiu-se a quantidade de material fino.

Utilizando a classificação unificada o solo não sofre alterações na classificação, pelo menos a níveis gerais, sendo classificado na mesma como um solo de granulometria grossa, como Areias e finalmente como Areias com mais de 12% de finos, no entanto, como não foram obtidos os valores dos Limites de Atterberg, não é possível fechar a classificação, existindo apenas a percepção de que dentro desta classificação, com a adição de resíduos, o solo não sofre alterações de classificação significativas.

Considerando a classificação para fins rodoviários, as misturas classificam-se como Materiais Granulares (35% ou menos passados pelo peneiro nº200). Considerando a percentagem que passa nos peneiros de abertura nominal de 0,073mm, as misturas inserem-se no grupo A-2, tomando-se como excelentes a bons materiais no comportamento geral como subleito.

Analisando a classificação para fins rodoviários das diferentes amostras, pode-se discutir que o facto de se adicionar resíduos como as cinzas de fundo e as cinzas volantes, torna possível o aumento da quantidade de material grosseiro no solo, podendo mesmo alterar a classificação geral do solo, atribuindo-lhe um melhor comportamento quando utilizado, por exemplo, para subleito do pavimento.

Na Tabela 4.2 são apresentados os valores obtidos para o ensaio dos Limites de Atterberg.

Tabela 4.2 - Valores dos Limites de Atterberg (Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Índice de Plasticidade).

Amostra	L.L (%)	L.P (%)	I.P (%)
REF	23	18,8	4,2
SBA	25	18,2	6,8
SF	29	21,2	7,8

Apesar de os valores serem muito próximos observa-se uma variação do limite de liquidez comparando as amostras REF, SBA e SF apesar de todas elas serem representativas do solo recolhido na unidade fabril da Portucel/Soporcel. Uma possível explicação para a variação de 2% entre as amostras REF e SBA trata-se da acumulação superior de humidade num pequeno volume de amostra utilizada no *fall cone test*, apresentando uma penetração maior nessa mesma amostra, apesar da humidade global ser inferior. Em relação à variação de 6% em relação à amostra REF e SF, e de 4% em relação à amostra SBA e SF, pode explicado pelo maior número de finos presentes na amostra SF ou pelo motivo já apresentado anteriormente (acumulação de água numa amostra recolhida, influenciando calculo da equação da reta do limite de liquidez).

Na Figura 4.10 apresentam-se os resultados do ensaio Limite de Liquidez.

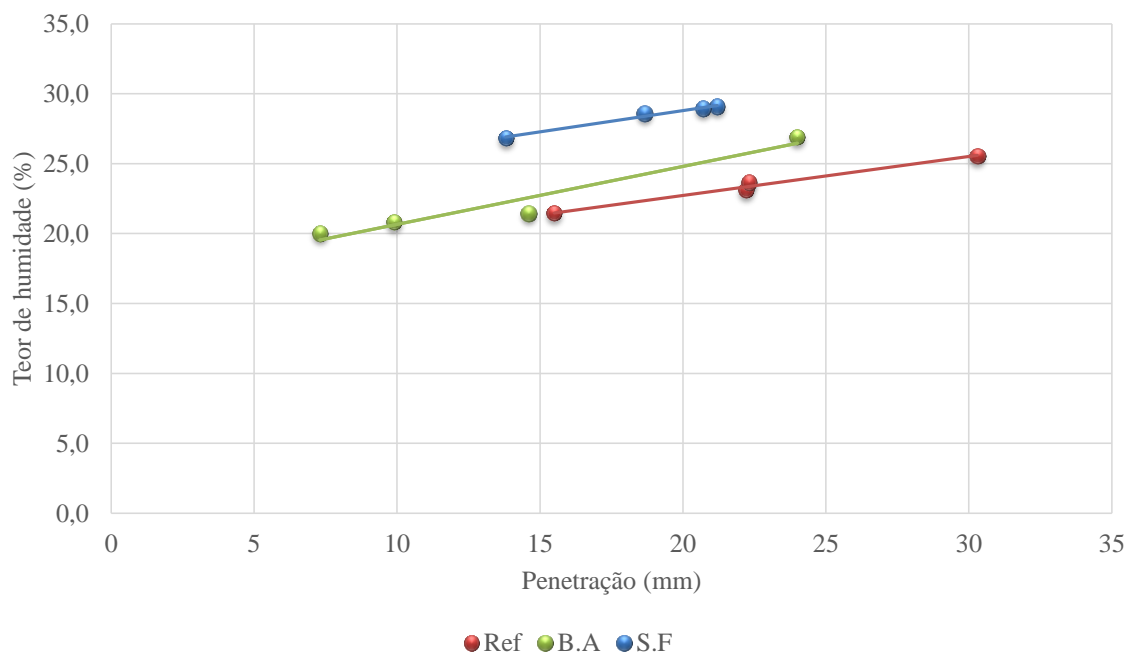


Figura 4.10 - Reta de resultados do ensaio Limite de Liquidez

A Tabela 4.3 apresenta os valores do índice de liquidez para as várias amostras de solo recolhidas.

Tabela 4.3 - Valores do Índice de Liquidez (IL)

Amostra	IL
REF	3,00
SBA	2,10
SF	2,20

Devido a todos os valores apresentarem índices de consistência superiores à unidade, pode-se classificar as amostras como sendo solos de consistência dura, uma característica em termos gerais boa, quando a intenção passa pela aplicação do solo em pavimentos rodoviários, no entanto, que acarreta também problemas como a extração e compactação do solo quando é essencial a realização de movimentos de terras. Esta classificação quanto ao índice de consistência demonstra que o solo utilizado, por si só, já apresenta boas características para ser utilizado na fundação de pavimentos rodoviários, por isso, se a adição de resíduos implementar uma melhoria nas características do solo, revela-se a viabilidade deste tipo de solução.

Na Tabela 4.4 são apresentados os valores obtidos para a massa volúmica do solo e resíduos utilizados neste estudo.

Tabela 4.4 - Resultados do ensaio da Massa Volúmica

Amostra	g/cm³
SF	2,59
CF	2,67
CV	2,71

Os valores calculados para a massa volúmica apresentam-se muito semelhantes, apesar de uma pequena variação poder significar uma diferença significativa quando estão em questão grandes quantidades de material. A cinza volante apresenta-se como o material mais denso, seguido da cinza de fundo e finalmente do solo de fundação. O facto de não existir uma grande variação da massa volúmica revela a compatibilidade dos materiais quando misturados. Em termos de mistura, a que conter cinzas volantes poderá apresentar uma maior densidade, proporcionando um maior obstáculo à infiltração da água, assim como uma maior compactação e consistência.

Na Tabela 4.5, apresentam-se os resultados obtidos do ensaio de determinação do teor de equivalente de areia.

Tabela 4.5 - Resultados do Equivalente de Areia.

Amostra	EA (%)
REF	35
SBA	37
SF	41
CF	97
CV	63
M1	54
M2	44
M3	52

Considerando os valores representativos do solo (REF, SBA e SF) existe pouca variação do valor de Equivalente de Areia, valores esperados, considerando que se trata do mesmo solo, apenas diferindo a quantidade de finos presentes na amostra. Sendo o solo de

fundação (SF) um solo mais fino é normal que apresente um valor de equivalente de areia ligeiramente superior.

No caso das cinzas de fundo obtém-se um valor de 97%, revelando que é um material com uma reduzida quantidade de impurezas. Em relação às cinzas volantes, apesar de serem resíduos, possuem uma quantidade superior de impurezas, existindo uma diferença de 34% no ensaio de equivalente de areia comparando com a amostra de cinzas de fundo. Em relação às misturas existe um decréscimo da quantidade de impurezas, explicada pelas cinzas de fundo e cinzas volantes adicionadas. Por ordem decrescente de adição de cinzas de fundo tem-se as amostras de misturas M1, M3 e M2, refletindo-se também num aumento do valor de teor de equivalente de areia comparando com as amostras de solo: 54, 52 e 44% respetivamente, podendo-se assumir que com a adição deste resíduo diminuámos a quantidade de finos associados num solo, decrescendo consequentemente o valor de finos associados a material grosseiro, o que torna o solo mais propício a ser utilizado, por exemplo, num leito de pavimento, cuja exigência segundo o caderno de encargos de Estradas de Portugal (2009) impõe no mínimo um valor de equivalente de areia de 30%. O solo utilizado neste estudo por si só já preenche este requisito para ser utilizado no leito de pavimento de um pavimento rodoviário, no entanto, para solos cujo valor de EA seja inferior a 30% a adição de cinzas de fundo e cinzas volantes revela-se benéfica para aumento deste fator.

Na Tabela 4.6 são apresentados os valores de VBS obtidos pelo ensaio de azul-de-metileno.

Tabela 4.6 - Valores do parâmetro valor de Azul-de-metileno

Amostra	VBS (g/100g de material)
SF	5
CF	0,1
CV	0,2
M1	2,3
M2	2
M3	1,8

Considerando a Tabela 3.4, os resíduos utilizados (CF e CV) apresentam muito pouca ou nenhuma sensibilidade à água. O valor de VBS do solo de fundação (SF) está mais

próximo do valor que distingue os solos siltosos dos argilosos, valor este que nas misturas M1, M2 e M3 é drasticamente reduzido pela adição de cinzas de fundo e cinzas volantes, havendo um decréscimo de no mínimo 2,7 (g de azul de metileno/100g de material), conferindo ao solo outra classificação facilmente consultável na Tabela 3.4. A diminuição do valor de VBS do solo de fundação com a adição de cinzas de fundo e cinzas volantes revela-se benéfico quando está em vista uma utilização do solo em fundações de pavimentos rodoviários, pois segundo o caderno de encargos de (Estradas de Portugal, 2009) o valor máximo de VBS é de 2g por cada 100g de solo, por isso com a adição de resíduos conseguimos um decréscimo significativo do VBS, e assim como comprovado com o ensaio de equivalente de areia o solo revela-se mais conveniente para ser utilizado em fundações de pavimentos rodoviários com a adição de cinzas de fundo e cinzas volantes.

4.1.2 Caracterização química e mineralógica

Da Figura 4.11 à Figura 4.16 apresentam-se os resultados da caracterização mineralógica.

O difratograma de seguida apresentado (Figura 4.11) demonstra que as fases mineralógicas encontradas no solo de fundação foram: Quartzo (SiO_2), Albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) e Muscovite-1M ($\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$), tendo como fase predominante o Quartzo. Sendo a amostra apresentada representativa de um solo, que naturalmente é constituído por areia, silte e argila, e incluindo a esta análise a classificação granulométrica anteriormente efetuada (que atribui ao solo a classificação de arenoso), justifica-se que a fase predominante seja Sílica em forma de Quartzo.

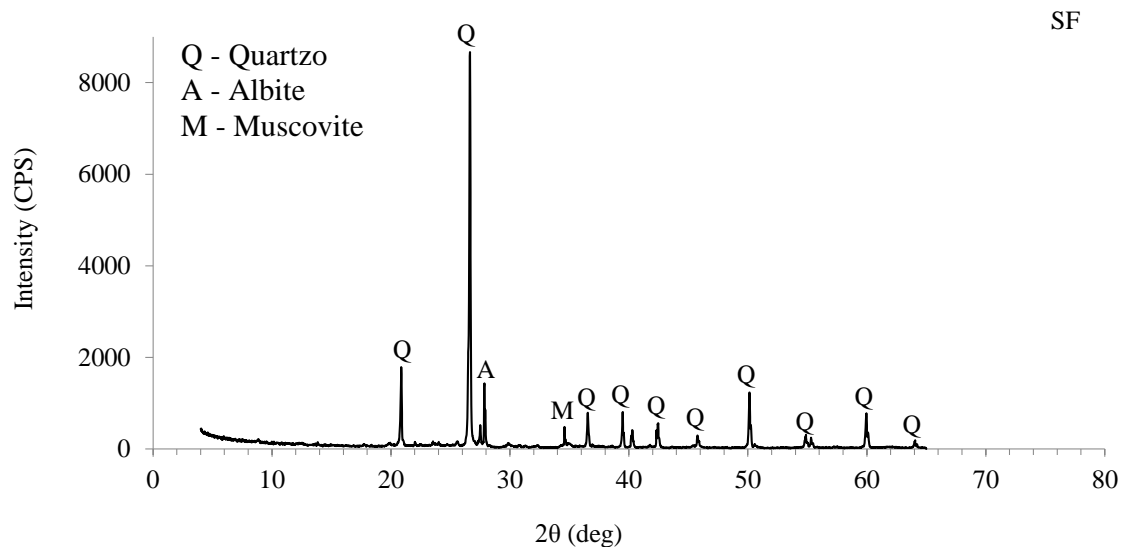


Figura 4.11 - Difratoograma de raios X do solo de fundação (Q = Quartz (SiO₂), A = Albite (NaAlSi₃O₈), M = Muscovite-1M (KAl₂Si₃AlO₁₀(OH)₂)).

O difratograma da Figura 4.12 demonstra que as fases mineralógicas encontradas nas cinzas de fundo foram: Quartz (SiO₂), Microclina (KAlSi₃O₈) e Albite (NaAlSi₃O₈) tendo como fase predominante o Quartz. As cinzas de fundo provêm de um leito fluidizado composto por areia siliciosa, explicando-se o facto de a fase predominante ser sílica na forma de Quartz. Também as partículas de solo florestal misturadas com resíduos florestais de biomassa, resultantes de más práticas de recolha e manuseamento da biomassa, e impurezas (partículas de solo florestal), podem contribuir para o aparecimento de Al e K (presentes na composição mineral da microclina e albite), como referido no estudo de Modolo et al. (2014).

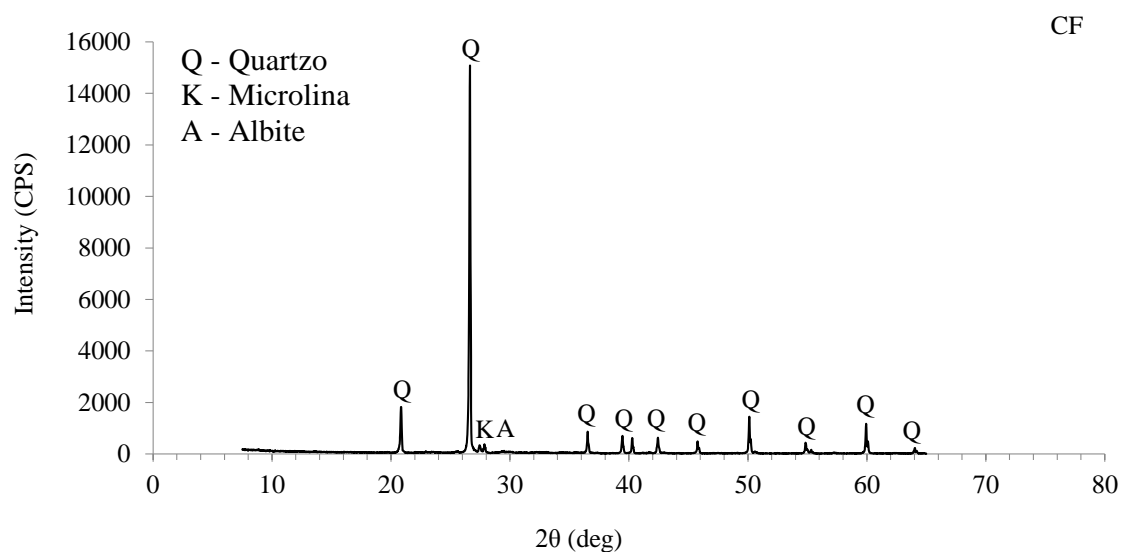


Figura 4.12 - Difratoograma de raios X das cinzas de fundo (Q = Quartzo (SiO_2), K = Microclina (KAlSi_3O_8), A = Albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)).

O difratograma da Figura 4.13 demonstra que as fases mineralógicas encontradas nas cinzas volantes foram: Quartzo (SiO_2), Microclina (KAlSi_3O_8), Calcite (CaCO_3), Sylvite (KCl), Sulfato de Cálcio ($\text{Ca}(\text{SO}_4)$) e Kalicinite ($\text{K}(\text{HCO}_3)$) tendo como fase predominante o Quartzo. Parte da constituição deste material provém das areias do leito, que devido ao atrito entre partículas durante o processo de combustão, libertam partículas mais finas que são purgadas no electrofiltro, influenciando na composição das cinzas volantes. Também a própria biomassa florestal, queimada na caldeira onde são gerados os resíduos, contribui para a composição mineralógica das cinzas volantes, logo, este resíduo é constituído de cinzas da biomassa e outras substâncias provenientes dos materiais utilizados no leito.

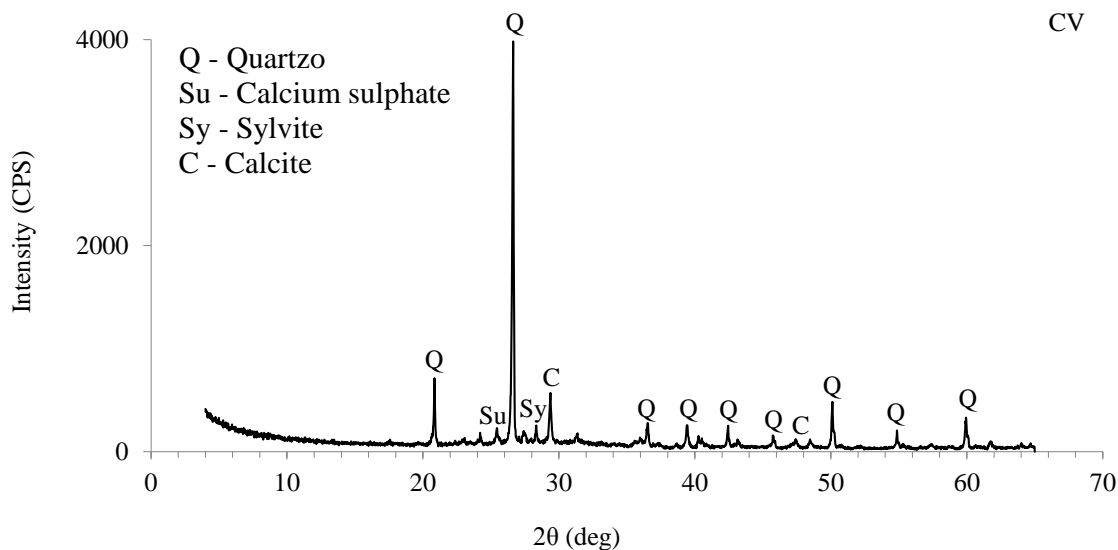


Figura 4.13 - Difratoograma de raios X das cinzas volantes (Q = Quartzo (SiO_2), C = Calcite (CaCO_3), Su = Sulfato de Cálcio ($\text{Ca}(\text{SO}_4)$, Sy = Sylvite (KCl)).

O difratograma da Figura 4.14 demonstra que as fases mineralógicas encontradas na mistura 1 (solo de fundação e cinzas de fundo): Quartzo (SiO_2), Microclina (KAlSi_3O_8), Calcite (CaCO_3), Muscovite-2M2 ($(\text{K},\text{Na})\text{Al}_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), Albite ($\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$) e Muscovite-2M1 ($\text{K}(\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_9(\text{OH})_3$), tendo como fase predominante o Quartzo.

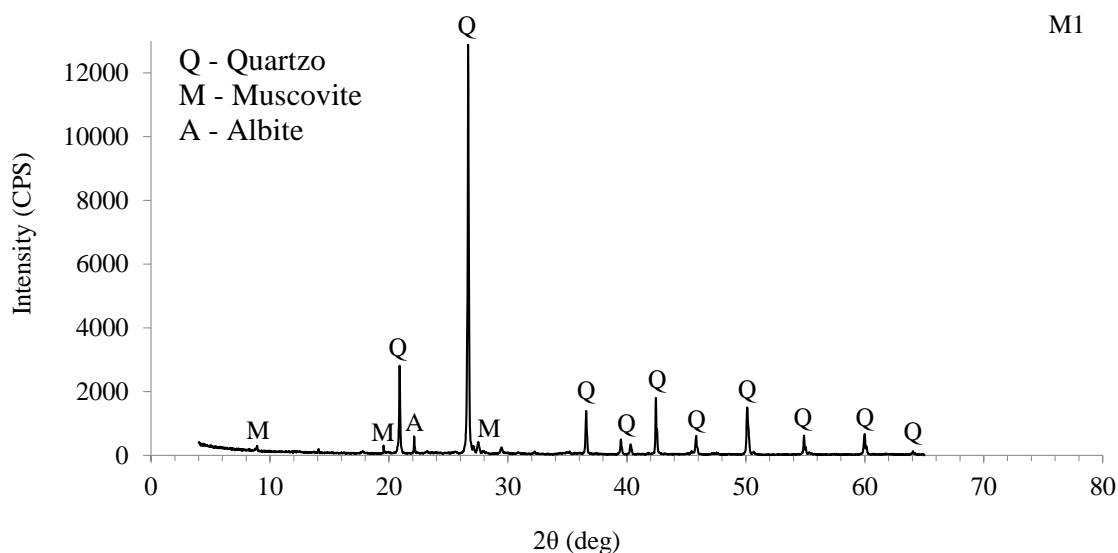


Figura 4.14 - Difratoograma de raios X da M1 (Q = Quartzo (SiO_2), Microclina (KAlSi_3O_8), Calcite (CaCO_3), Sylvite (KCl), Sulfato de Cálcio ($\text{Ca}(\text{SO}_4)$) e Kalicinite ($\text{K}(\text{HCO}_3)$)).

O difratograma da Figura 4.15 demonstra que as fases mineralógicas encontradas na mistura 2 (solo de fundação, cinzas de fundo e cinzas volantes): Quartzo (SiO_2),

Microclina (KAlSi_3O_8), Calcite (CaCO_3), Albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) e Muscovite-2M2 ($(\text{K},\text{Na})\text{Al}_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), tendo como fase predominante o Quartzo.

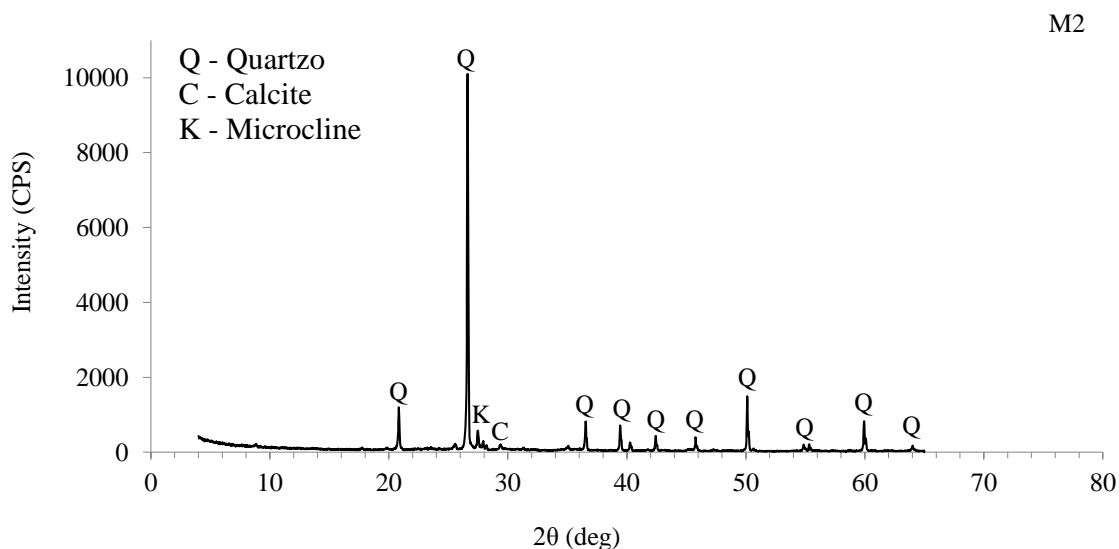


Figura 4.15 - Difratoograma de raios X da M2 (Abreviaturas: Q = Quartzo (SiO_2), C = Calcite (CaCO_3), K = Microclina (KAlSi_3O_8))

O difratograma da Figura 4.16 demonstra que as fases mineralógicas encontradas na mistura 3 (solo de fundação, cinzas de fundo e cal hidráulica): Quartzo (SiO_2), Microclina (KAlSi_3O_8), Calcite (CaCO_3), Albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) e Muscovite-2M2 ($(\text{K},\text{Na})\text{Al}_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), tendo como fase predominante o Quartzo.

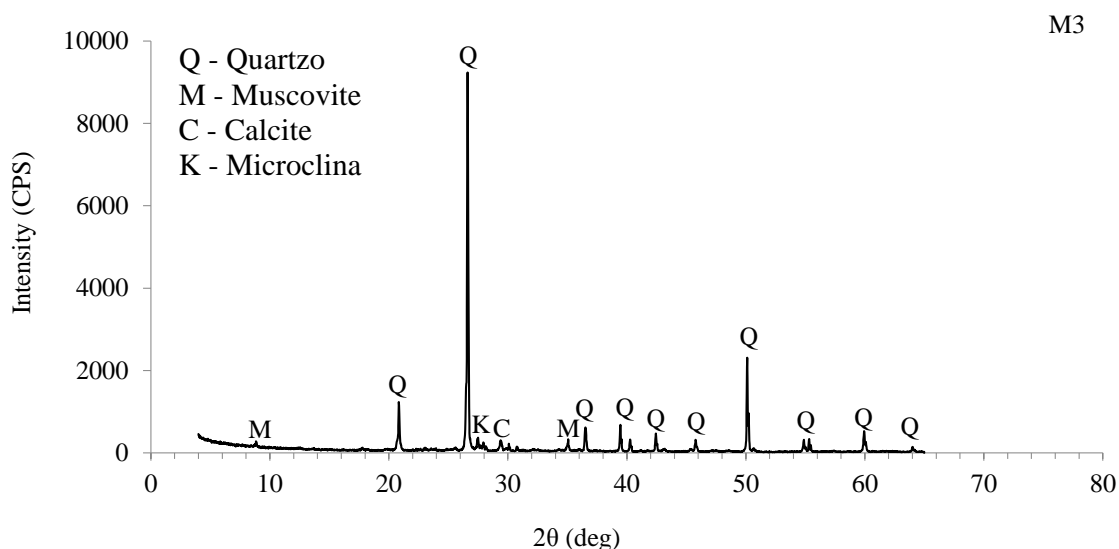


Figura 4.16 - Difratoograma de raios X da M3 (Abreviaturas: Q = Quartzo (SiO_2), C = Calcite (CaCO_3), K = Microclina (KAlSi_3O_8), M = Muscovite-2M2 ($(\text{K},\text{Na})\text{Al}_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$))

A composição química das amostras SF, CF e CV é apresentada na Tabela 4.7, onde o teor de LOI (Loss on Ignition – perda ao rubro) diz respeito à percentagem de material que se volatiliza a 550°C.

O ensaio de FRX comprova os picos gráficos do ensaio DRX, confirmando que todas as amostras são essencialmente constituídas por quartzo, não implicando alterações mineralógicas significativas a uma possível mistura de solo e resíduos.

Tabela 4.7 - Composição química elemental das amostras CF, CV e SF

Elemento	CF wt%	CV wt%	SF wt%
LOI	1,2	5,1	3,9
Na	0,5	0,5	0,2
Mg	0,4	0,4	0,2
Al	2,7	2,7	7,2
Si	39,2	23,6	35,7
P	0,2	0,7	0,2
S	0,02	1,3	0,1
Cl	0,03	1,0	0,0
K	1,5	3,6	2,0
Ca	3,3	9,3	0,1
Ti	0,1	0,3	0,2
Mn	0,1	0,2	0,0
Fe	0,8	2,5	1,3
O	51,1	53,9	52,7

Na Tabela 4.8 são apresentados os valores do ensaio de quantificação de cloretos solúveis.

Tabela 4.8 - Valores do ensaio de quantificação de cloretos

Amostra	Concentração (mg/kg)
REF	135
SBA	91
SF	71
CF	95
CV	10674
M1	113
M2	3510
M3	108

Observa-se que o nível de cloretos nas amostras de solo (REF, SBA e SF) não é muito significativo, apesar de existir diferenças, principalmente da amostra SF para a amostra REF, no entanto, justifica-se pelo grande diferencial que pode existir entre o solo recolhido de diferentes localizações.

As cinzas volantes apresentam um teor significativo de cloretos, o que se reflete um teor elevado de cloretos na mistura 2, pois 25% da constituição da amostra M2 são cinzas volantes. Considerando que o solo usado na mistura 2 é solo de fundação (SF) onde é calculado um valor de 71 (mg/kg), é de notar um aumento substancial de cloretos para 3510 (mg/kg) na amostra M2. Comprova-se que com a adição de cinzas de volantes a concentração de cloretos aumenta drasticamente face a amostras que apenas contêm cinzas de fundo, o que em termos ambientais se pode considerar prejudicial.

Da interpretação do gráfico respetivo à Figura 4.17, da análise térmica das cinzas volantes ressalta o fenómeno de uma perda de peso de cerca de 2% até 550° indicando que poderá existir na amostra algum material carbonáceo que não foi totalmente oxidado durante o processo de combustão, ou poderá estar relacionado com a presença de matéria orgânica. Por outro lado, a análise térmica das cinzas de fundo, representada na Figura 4.18, indica uma notável perda de peso entre 600 e 800°C pela libertação de CO₂ dos carbonatos (principalmente calcite). A ausência de picos exotérmicos entre 250 e 500°C confirma que a queima de biomassa está completa. Caso contrário, a restante matéria inqueimada/orgânica deve decompor-se nesta gama de temperatura, como referido no estudo de Modolo et al. (2014).

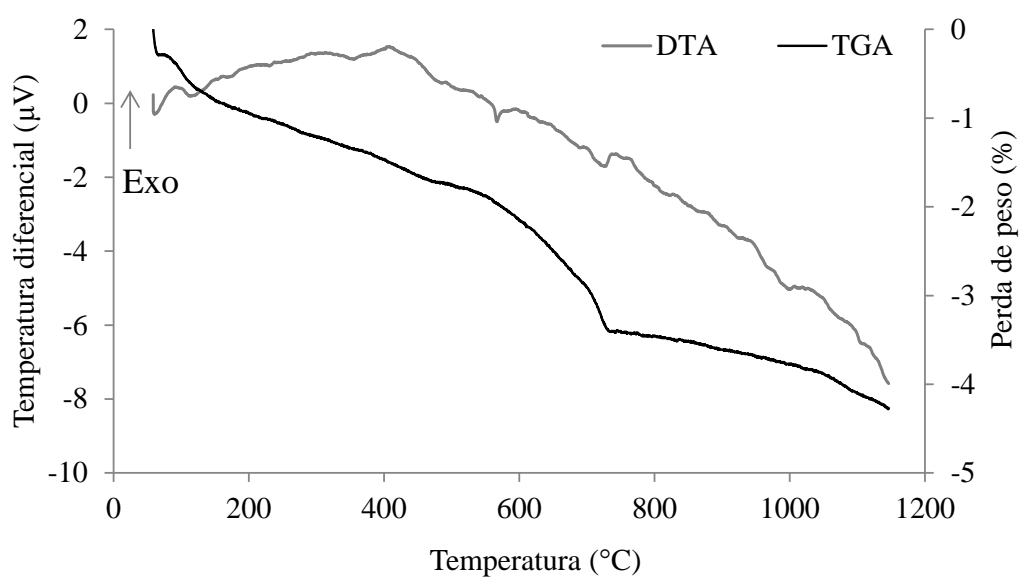


Figura 4.17 - Análise térmica das Cinzas Volantes

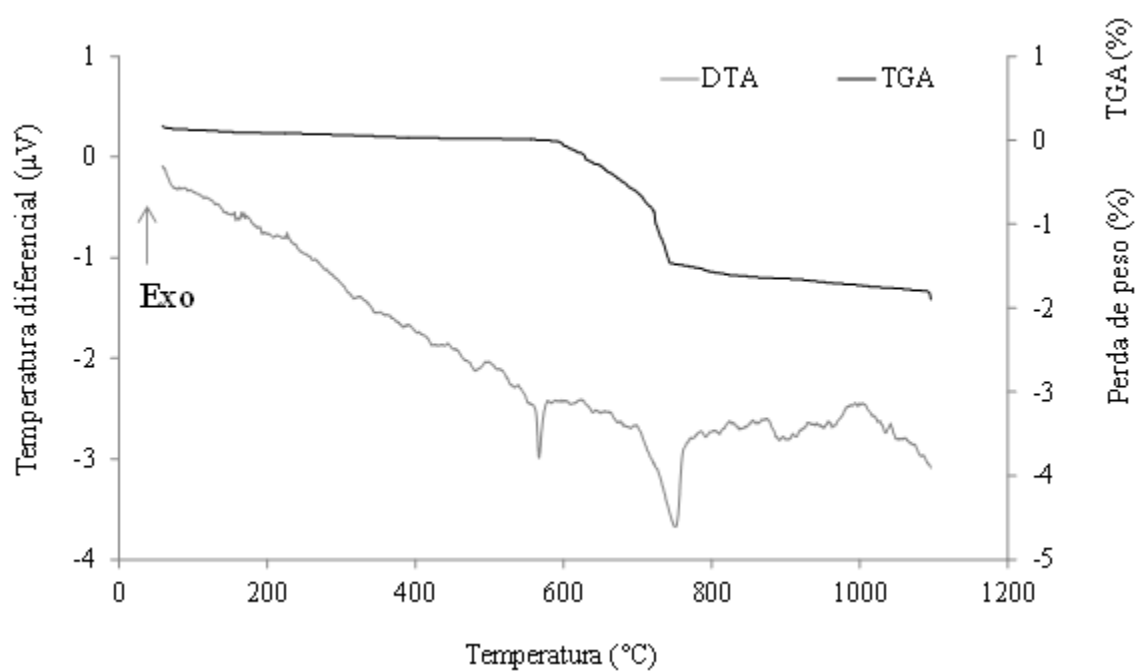


Figura 4.18 – Análise térmica das Cinzas de Fundo (Modolo et al., 2014)

4.1.3 Caracterização mecânica

O gráfico apresentado na Figura 4.19 refere-se aos resultados do ensaio Proctor, realizado para todas as amostras (SF, CF, CV, M1, M2 e M3).

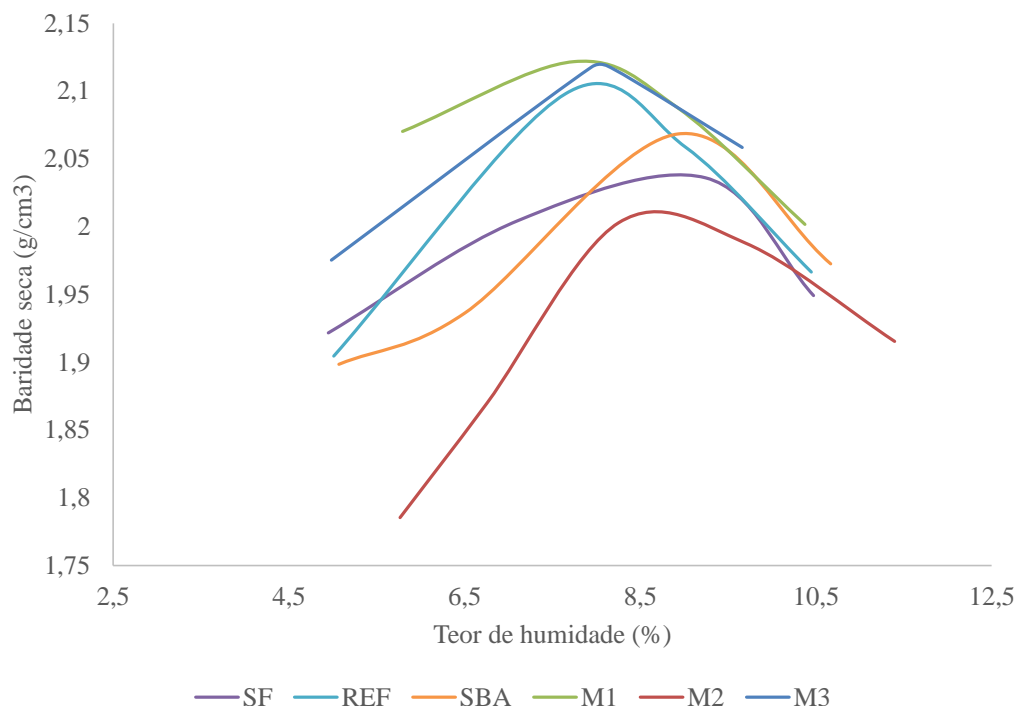


Figura 4.19 - Curvas de resultados do ensaio Proctor (Abreviaturas: SF = Solo de Fundação, REF = Referência, SBA = Solo “bottom ashes”, M1 = Mistura 1, M2 = Mistura 2, M3 = Mistura 3).

Em relação ao teor de humidade ótimo existe uma variação máxima de 1%. O solo de fundação tem um teor ótimo de humidade na grandeza dos 9%, valor este que diminuiu com a adição dos resíduos.

A mistura 1 e a mistura 3 foram as que apresentaram um maior nível de compactação, apresentando um valor de baridade seca na ordem dos $2,13\text{g/cm}^3$, o que revela que uma mistura de solo de fundação com cinzas de fundo, acaba por resultar numa maior compactação das partículas para um teor de humidade ótimo, possivelmente conferindo também mais resistência mecânica ao próprio solo. Este aumento de compactação pode ser explicado em termos granulométricos, pois ambas as amostras contêm uma curva granulométrica semelhante.

As várias amostras de solo apresentaram um menor valor de baridade seca, demonstrando que o solo, sem qualquer aditivo, é um material que compacta menos no seu nível ótimo de

humidade. Os resíduos, devido à sua constituição granulométrica têm a capacidade de preencher espaços vazios presentes nas amostras de solo, melhorando a compactação. A mistura 2 revela que com a adição de cinzas volantes, a baridade seca máxima do SF diminui, isto possivelmente porque estamos a utilizar um aditivo com maior quantidade de finos e menor peso específico. Apesar da mistura 2 apresentar uma curva mais baixa não significa que se trata da mistura menos resistente, como se comprova nos resultados do ensaio CBR apresentados de seguida.

A Figura 4.20 refere-se à curva de resultados do ensaio CBR. Relacionando a penetração com a força necessária para a impor, observa-se que todas as misturas aumentaram a resistência à penetração do pilão com a adição dos resíduos, face às amostras de solo. Nota-se pela curva, que mesmo os primeiros pontos (denominados como de “calibração”) se sobrepõem às amostras representativas do solo.

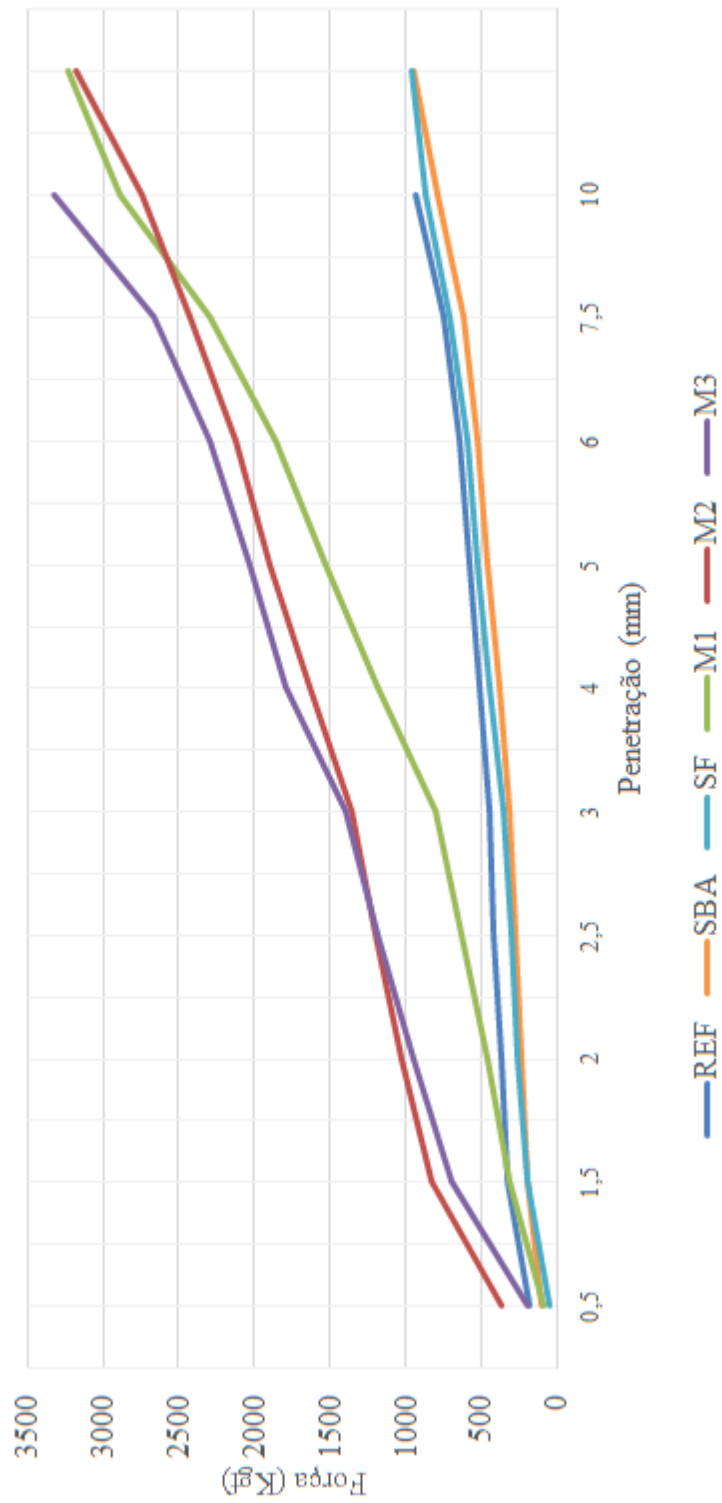


Figura 4.20 - Curvas de resultados do ensaio CBR (Abreviaturas: REF = Referência, SBA = Solo ‘Bottom Ashes’, SF = Solo de Fundação, M1 = Mistura 1, M2 = Mistura 2, M3 = Mistura 3)

Existiu um aumento significativo do valor de CBR com a adição dos resíduos, como se pode visualizar na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Resultados do ensaio CBR em percentagem

Amostra	CBR 2,5mm	CBR 5mm
REF	30,9	28,5
SBA	19,0	28,8
SF	23,0	25,9
M1	46,8	75,5
M2	88,9	93,6
M3	87,7	100,0

O valor de CBR, a ser tomado em conta, deve ser o valor máximo das duas penetrações (2,5 e 5mm).

Comparando apenas a amostra de solo de fundação (SF) com as misturas, visto tratar-se da amostra escavada em maior profundidade e utilizada para fazer todas as misturas, verifica-se que existe um aumento elevado do valor do CBR. Comparando com a M1, M2 e M3, existiu um aumento de 49,6%; 67,7% e 74,1% respetivamente, claramente indicando o aumento de resistência mecânica do solo com a adição dos resíduos.

As amostras de resíduos M2 e M3 são as que apresentam uma maior resistência mecânica, seguindo-se da amostra M1. Também se verifica com este ensaio a compatibilidade a nível granulométrico, pois esperava-se uma boa agregação das partículas dos resíduos devido à sua curva granulométrica, o que pode ter influenciado no aumento da resistência mecânica do solo com a adição dos resíduos, assim como uma maior compactação do solo. Verifica-se que a junção de cinzas de fundo criou um efeito ligante, melhorando a resistência mecânica da mistura.

A mistura 2, apesar de no ensaio Proctor não ter apresentado uma baridade seca elevada, obteve valores de resistência mecânica elevados, quando comparando com as amostras de solo ensaiadas, revelando que com a adição de cinzas volantes é criado um efeito ligante e uma boa compactação, contrariando o efeito de penetração do pilão, oferecendo mais resistência mecânica à mistura.

4.2 Ensaio de Campo

Relativamente ao ensaio de campo realizado no solo da unidade fabril da Portucel/Soporcel, é de notar que, o efeito do tempo associado a sucessivas molhagens da chuva, e do passar do tempo, o solo não ganhou uma consistência significativa, sendo impossível circular na sua superfície sem causar grandes deformações. A fraca consistência é de fácil justificação, pois durante uma visita ao local foi possível penetrar na camada de resíduo com a própria mão, verificando-se que, assim como na simulação apresentada no próximo tópico, o solo não tem nenhuma resistência à penetração superficial, tornando pouco viável este tipo de solução (Figura 4.21).

De maneira a comprovar e tentar colmatar esta situação, optou-se por realizar uma simulação laboratorial, utilizando misturas com cinzas de fundo, cinzas de fundo e cinzas volantes e finalmente, cinzas de fundo com cal hidráulica. A primeira mistura retrata a situação verificada na experiência de campo, por outro lado as outras duas misturas contêm ligantes a atuar, no entanto sempre com a presença de cinzas de fundo, pois trata-se de um resíduo prioritário a escoar.



Figura 4.21 - Pouca consistência das cinzas de fundo na experiência de campo

4.3 Simulação Laboratorial

Os resíduos aplicados à superfície do solo inicialmente não possuem uma resistência à penetração significativa, no entanto, se for adicionada água, os materiais vão sofrer alterações inculdas pela hidratação das partículas, agregando os componentes e criando um material com maior consistência, sendo esse o fundamento sobre o qual se realiza a

molhagem dos recipientes. As alterações podem ser comprovadas visualmente, com a desmontagem dos recipientes e ainda através dos ensaios laboratoriais realizados.

Justificada a motivação é efetuada essa molhagem, de maneira a perceber qual das misturas regista as alterações pretendidas (aumento de consistência e absorção de água significativa) registando-se fotograficamente todo o processo.

Na Tabela 4.10 é apresentado o esquema efetuado para a segunda molhagem dos recipientes. A primeira molhagem consistiu no depósito de 4l de água destilada, com um espaçamento temporal de 1h, suficiente para os recipientes ficarem saturados e verterem. Em termos cronológicos a primeira molhagem foi efetuada um mês antes da segunda molhagem, de maneira a haver tempo suficiente para garantir uma secagem, pelo menos superficial, dos recipientes.

Tabela 4.10 - Esquema da segunda molhagem dos recipientes

Data	Hora	Dose (l)	Recipiente 1	Recipiente 2	Recipiente 3
			Notas	Notas	Notas
18/09/2013	12:00	1	-	-	-
18/09/2013	14:00	1	-	-	Verteu
18/09/2013	15:00	1	Verteu	-	-
18/09/2013	19:00	1	-	Verteu	-
19/09/2013	19:00	1	-	-	-
20/09/2013	17:00	1	-	-	-

A água destilada, ao entrar em contacto com os componentes das misturas provoca um conjunto de reações de hidratação que alteram as características das mesmas, por isso a primeira molhagem serviu para incutir essas reações, havendo um aumento de consistência nos recipientes e agregação das partículas sendo visível a nível superficial.

Todos os recipientes foram sujeitos a uma adição de 6 litros de água destilada (na segunda molhagem), havendo um escoamento mais rápido da água no recipiente 3 (90% de cinzas de fundo + 10% de cal hidráulica), seguido do 1 (100% de cinzas de fundo) e finalmente do 2 (50% de cinzas de fundo + 50% de cinzas volantes). O esperado seria um escoamento mais rápido no recipiente 1, visto que se trata de um recipiente apenas com adição de cinzas de fundo ao solo, mas tal é explicado pela primeira molhagem efetuada, em que este

recipiente foi o primeiro a verter água. Depois dessa molhagem, houve possivelmente uma abertura de fissura que tornou possível um rápido escoamento da água adicionada ao recipiente 3. O recipiente 2, nas duas situações, foi o que mais tempo demorou a escoar a água, comprovando que a adição de cinzas volantes promove a absorção de água e dificulta o escoamento, fenómeno explicado pela consistência adquirida pela camada de resíduo, e também explicado a nível granulométrico, pois trata-se de uma adição de um material mais fino e denso (CV) a um menos denso e com curva granulométrica extensa (CF), havendo um maior preenchimento dos espaços vazios.

Na Figura 4.22 apresenta-se a imagem dos recipientes antes da molhagem, sendo visível algum material solto, revelando a pouca consistência dos resíduos principalmente no recipiente 1.



Figura 4.22 - Recipientes antes da molhagem (recipiente 1, 2 e 3 - da esquerda para a direita).

Na Figura 4.23 é possível notar as diferenças entre os vários recipientes durante a segunda molhagem. No primeiro recipiente o solo está encharcado sem acumulação de água à superfície, nos dois recipientes restantes acumula-se água. Este facto pode ter duas explicações: a rápida saturação da amostra ou a sua impermeabilização parcial devido às reações que ocorreram após a primeira molhagem. A acumulação de água superficial é facilmente visível no recipiente 2.



Figura 4.23 - Recipientes depois da molhagem (recipiente 1, 2 e 3 - da esquerda para a direita).

Na tabela seguinte apresenta-se os valores obtidos com o ensaio de penetração dos recipientes.

Tabela 4.11 - Resultados do ensaio à penetração nos recipientes

Recipiente	Penetração (cm)
1	8
2	0
3	0

O recipiente 1 é o único que não resistiu totalmente à penetração do pilão, pelo facto do material encontrar-se desagregado. Basicamente influenciado pela natureza e características do resíduo (cinzas de fundo). Os dois recipientes restantes não sofrem qualquer tipo de penetração, resistindo inteiramente ao lançamento do projétil, revelando que após a molhagem dos recipientes o nº2 e 3 ganharam uma maior consistência, resistindo inteiramente ao lançamento do pilão metálico.

O recipiente 1, contendo apenas cinzas de fundo, ganha pouca consistência, mas com a adição de cinzas volantes ou cal hidráulica tem uma melhor resposta face a forças aplicadas superficialmente, indicando a importância que um ligante incute nas cinzas de fundo. Note-se que este ensaio foi realizado após a primeira molhagem, com os resíduos secos superficialmente.

Na Figura 4.24 representa-se o momento em que se realizou o ensaio de penetração nos recipientes.

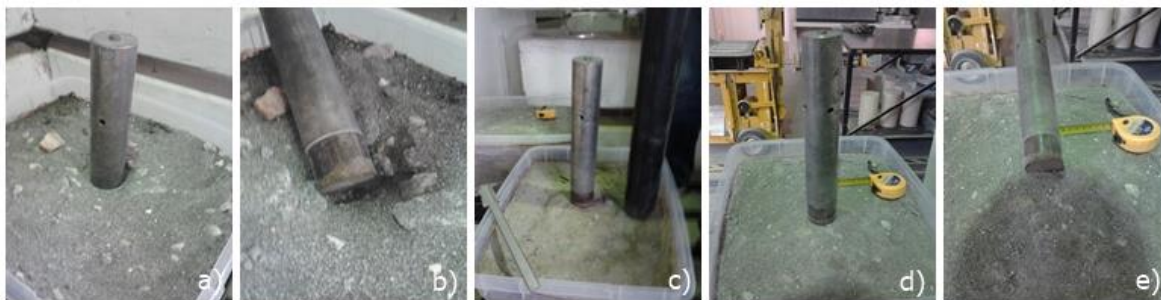


Figura 4.24 – Ensaio de penetração nos recipientes; figura a) e b) relativas ao recipiente 1, figura c) relativa ao recipiente 2 e restantes relativas ao recipiente 3

Obteve-se um valor de 0,46kN de força exercida no solo, considerando a área de embate do pilão 113cm^2 , obtém-se um valor de tensão exercida de 40kN/m^2 , revelando a forte capacidade de resistência do solo após a molhagem.

A resistência à penetração dos recipientes revela também que a atuação de um ligante, apesar de no caso do recipiente 3, ser apenas 10% da quantidade de peso de amostra, é extremamente importante para garantir uma forte consistência da mistura.

Apesar de ter sido feito o ensaio do esclerometro apenas foi possível a recolha de valores na parte lateral do recipiente 2 e 3, no entanto, estes mesmo valores são demasiado baixos para ser possível correlacionar com o ábaco referente ao aparelho. Apesar de não serem utilitários quantitativamente, os valores referentes ao ensaio do esclerometro mostram que para uma maior compactação dos resíduos, de onde advém fatores já referidos anteriormente, existe uma clara indicação de um aumento da resistência do material.

Finalizados os ensaios não-destrutivos na simulação laboratorial procedeu-se à desmontagem dos recipientes já referenciada no ponto 3.2.4.3 para cumprir a recolha de amostras a ensaiar.

Para efetuar a recolha de amostras dos recipientes foi excluída a hipótese da utilização de uma caroteira mecânica, pois este equipamento desagregaria o solo, por isso optou-se, como explicado anteriormente nesta dissertação, por virar os recipientes num plástico, avaliando se a sua consistência permitia a utilização de uma máquina de corte para auxiliar a recolha de amostras.

Os recipientes 2 e 3 apresentaram consistência suficiente para serem levados à máquina de corte, por outro lado, o recipiente 1 não apresentou a consistência admissível para essa mesma recolha (Figura 4.25).



Figura 4.25 - a) – Amostra do recipiente 2; b) – Amostra do recipiente 3; c) – Amostra do recipiente 1.

Para identificar as amostras optou-se por um esquema de letras, de maneira a identificar o recipiente de onde provém a amostra e a localização da mesma. Para o recipiente 2 utilizam-se as letras maiúsculas “A e B” e para o recipiente 3 são utilizadas as letras “C e D”. Os esquemas são apresentados na Figura 4.26 e na Figura 4.27 (recipiente 2 e 3 respetivamente).

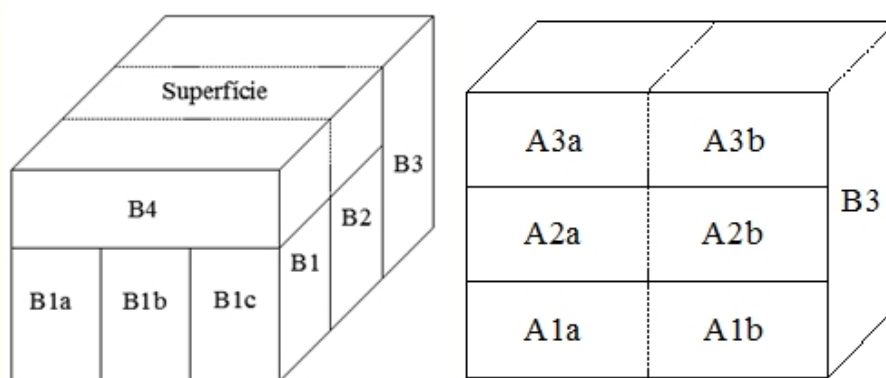


Figura 4.26 - Esquema de recolha de amostras do recipiente 2 (à esquerda observa-se a amostra total, à direita o esquema de amostras recolhidas a partir da zona B3).

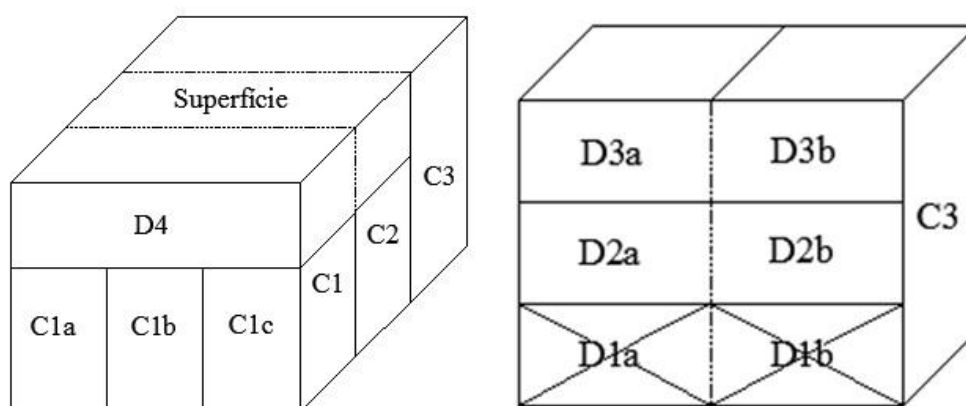


Figura 4.27 - Esquema de recolha de amostras do recipiente 3 (à esquerda observa-se a amostra total, à direita o esquema de amostras recolhidas a partir da zona C3).

As amostras representadas pelo símbolo “B4”, “D4” e “C” são amostras cúbicas, unicamente para, num ensaio destrutivo, ser analisada a resistência máxima à compressão. As amostras representadas pelas letras “A”, “B” e “D” são amostras em formato de prismas que serão ensaiadas, em ensaios destrutivos, de compressão e flexão.

Do recipiente 1 não foi possível recolher amostra, devido à fraca consistência das cinzas de fundo. O recipiente 3 apenas apresentou consistência para a recolha de amostras com um teor de humidade menor, por isso não foi possível recolher a amostra D1a e D1b, indicando que um teor de humidade alto contribui para um desfasamento da amostra mais suscetível do que quando a mesma amostra apresenta um teor de humidade mais baixo.

Na Tabela 4.12 são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão, flexão e Módulo de Elasticidade, em valores médios.

Tabela 4.12 - Valores de resistência à compressão, flexão e módulo de elasticidade dinâmico

Recipiente	Resistência à Compressão [MPa]	Resistência à Flexão [MPa]	E_{dinâmico} médio (GPa)
1	-	-	-
2	1,91	0,64	4,4
3	0,43	0,36	2,9

Analisando de forma geral a resistência à compressão dos recipientes, distintamente o número 2, que contém cinzas volantes, apresenta o valor mais elevado, indicando um nível de resistência muito superior quando comparado com os outros recipientes. Comprovando

o valor obtido pelo ensaio de CBR (no qual a mistura 2 obteve uma elevada resistência), e pelo ensaio de penetração, comprova-se que a mistura 2 trata-se da mistura mais resistente, tanto com a adição dos resíduos ao solo, como com a aplicação superficial. Examinando o módulo de elasticidade dinâmico em cada um dos recipientes observa-se que no recipiente 2 existe um material mais denso quando comparado com o recipiente 3, facto associada à presença de cinzas volantes na constituição do recipiente 2.

O recipiente 2 apresenta-se como o mais resistente à flexão. À semelhança do ensaio de resistência à compressão, o recipiente que contém cinzas volantes volta a ter uma resistência superior em parâmetros mecânicos.

Na Tabela 4.13 são apresentados os valores médios dos ensaios recolhidos da simulação laboratorial.

Tabela 4.13 - Valores médios dos ensaios da simulação laboratorial.

Ensaio	Recipiente 2		Recipiente 3	
	Prismas	Cubos	Prismas	Cubos
Pundit (km/s)	1,77	2,05	1,64	1,46
Edinâmico (GPa)	4,4	-	2,9	-
Compressão (MPa)	1,91	1,91	0,38	0,48
Flexão (MPa)	0,64	-	0,36	-
Densidade (g/cm³)	1,58	1,78	1,57	1,68
Absorção (%)	27,9		-	
Porosidade (%)	40,9			

Analisando a Tabela 4.13 é possível verificar que, no recipiente 2, a onda ultrassónica, impelida no ensaio em que se recorreu ao aparelho PUNDIT, percorre o provete em menos tempo que no recipiente 3. O valor do módulo de elasticidade dinâmico comprova o que foi dito anteriormente, também sendo corroborado com o valor da densidade aparente sendo esta mais elevada no recipiente 2 devido a uma maior compactação natural do material e uma ligação maior das partículas causada pelo efeito de hidratação do material.

Quando aos valores de resistência à compressão e à flexão nota-se, como já referido, um prevalecimento do recipiente 2 face ao recipiente 3 revelando que, uma aplicação superficial de uma mistura de cinzas de fundo com cinzas volantes, é mais viável que a combinação de cinzas de fundo com cal hidráulica.

Quando a ensaios realizados com o princípio de Arquimedes, neste caso, ensaio de absorção e porosidade, apenas foi possível a sua realização para amostras do recipiente 2, pois as do recipiente 3 facilmente se desfaziam quando saturadas, impedindo a recolha viável de valores. Quanto ao recipiente 3, apesar de não ser possível a realização dos ensaios baseados com o princípio de Arquimedes, pode-se relacionar a fragilidade da amostra com uma possível absorção e porosidade aberta mais elevada quando comparando com as amostras do recipiente 2.

CAPÍTULO 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho permitiu concluir que os resíduos em estudo revelam potencial de aplicação como adição a um solo de fundação em pavimentos rodoviários. A utilização destes resíduos resulta em impactos positivos a nível ambiental e económico. A valorização dos resíduos utilizados neste estudo traduz-se num decréscimo dos impactos ambientais associados à deposição dos mesmos em aterro, minimizando também a exploração de agregados naturais não renováveis.

Solução que implica revolver o solo com misturas de resíduo:

Os resíduos designados como cinzas de fundo e cinzas volantes foram incorporados em misturas com adição a um solo de fundação. Em termos de distribuição granulométrica o solo de fundação recolhido apresenta uma curva granulométrica com uma configuração semelhante às cinzas de fundo, revelando a potencialidade de adição sem alterar fisicamente o solo. As cinzas volantes são materiais mais finos, o que torna a curva granulométrica mais suave quando misturada com o solo de fundação, contribuindo para um melhor preenchimento dos espaços vazios, sendo um fator de aumento da agregação e consistência do material. Em termos de classificação, o solo é melhorado pela adição de resíduos, tendo como comportamento geral no subleito de excelente a bom. Todos os materiais (solo, resíduos e consequentes misturas) são constituídos a nível mineral essencialmente por sílica em forma de quartzo, traduzindo a sua compatibilidade neste nível.

Quanto ao grau de impurezas, concluiu-se que a adição de resíduos reduz a quantidade de finos associados a material grosseiro, tornando o material mais limpo. Um requisito importante para a utilização do solo em pavimentos rodoviários, havendo melhorias no solo (diminuição de impurezas) quando misturados resíduos, factos comprovados com o ensaio de Equivalente de Areia e Azul-de-metileno.

Em termos mecânicos as misturas de resíduos revolvidas com o solo apresentaram valores de resistência drasticamente superiores quando comparadas com o solo de fundação sem qualquer aditivo, revelando através do ensaio CBR, a grande potencialidade desta solução de valorização quando se pretende conferir a um solo uma maior resistência mecânica. As cinzas volantes atuam como um ligante, agregando as partículas e consequentemente

aumentando a sua consistência. Esta fator pode ser útil quando, num pavimento rodoviário, é necessário implementar uma camada de leito de pavimento, para conferir melhor características ao solo.

O único inconveniente encontrado nesta solução é o nível elevado de cloretos solúveis na mistura 2, devido à presença de cinzas volantes. Este resíduo ao ter uma elevada quantidade de cloretos solúveis e ao ser misturado com o solo e com as cinzas de fundo levará a que essa mistura aumente também o seu teor de cloretos, não sendo uma solução muito favorável em termos ambientais.

Solução que implica a aplicação superficial dos resíduos sobre o solo:

Com a aplicação de cinzas de fundo na superfície de um solo cedido pela unidade fabril da Portucel/Soporcel concluiu-se que nenhum fator (condições atmosféricas adversas, compactação natural) contribui para um aumento significativo de consistência das partículas do resíduo. Esta solução que implica apenas a utilização de cinzas de fundo revela-se ineficaz quando aplicada diretamente sobre o solo.

Com a necessidade de realizar uma simulação laboratorial envolvendo mais misturas de resíduos, concluiu-se que a adição de um ligante (cinzas volantes ou cal hidráulica) confere ao solo uma consistência elevada, quando comparado com a mistura só envolvendo cinzas de fundo. Os ensaios realizados com as amostras recolhidas nos recipientes da simulação laboratorial demonstram que a mistura mais eficaz é sem dúvida a que contém cinzas volantes, chegando-se a obter um valor de resistência à compressão na ordem dos 1,91MPa, corroborando os ensaios de caracterização geral que atribuíram a esta mistura a melhor classificação mecânica. A mistura que contém cal hidráulica (M3) também apresenta resultados favoráveis de consistência, mas conclui-se que uma adição de 10% de cal hidráulica é ineficaz para agregar, de forma desejada, as partículas. Todas as amostras recolhidas do recipiente 3 facilmente se desfaziam quando movidas manualmente; tanto as que continham um certo teor de humidade, com as que posteriormente foram secas em estufa.

Quanto à aplicação dos resíduos num pavimento não se verificaram todas as condições necessárias para afirmar que esse mesmo solo (com os aditivos) pode ser aplicado em leito de pavimento ou em sub-base de um pavimento rodoviário segundo o caderno de encargos de Estradas de Portugal (2009). No entanto, todas as misturas utilizadas na caracterização

geral (onde se revolveu o solo com resíduos) apresentaram melhoria de resultados na maioria dos parâmetros de exigência para utilização em leito do pavimento ou em sub-base quando comparado com o solo sem qualquer aditivo. Existiu um aumento drástico do valor de CBR, cumprindo a exigência do caderno de encargos das Estradas de Portugal; uma diminuição do número de finos passados no peneiro 200 da ASTM, resultado da adição de material mais grosseiro ao solo, incluindo a mistura 2 apesar de esta conter 50% de cinzas volantes, e uma diminuição intensa do nível de impurezas com a adição de resíduos. Concluindo-se que se trata de uma solução com potencial quando se pretende melhorar as características físicas e mecânicas de um solo de fundação com vista a sua utilização em pavimentos rodoviários.

Trabalhos futuros:

- Realização de simulações laboratoriais envolvendo mais misturas de solo e resíduos;
- Aplicar no campo as misturas que revelam apresentar uma maior consistência;
- Estudo do fenómeno de hidratação das cinzas volantes;
- Realizar o ensaio CBR para diferentes teores de humidade e compactações.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aggarwal, P.; Aggarwal, Y.; Gupta, S. M. (2007). *"Effect of bottom ash as replacement of fine aggregates in concrete"*, Asian Journal of Civil Engineering (Building and housing). Vol. 8, p. 49-62.

Ahmadi, B.; Al-Khaja, W. (2001). *"Utilization of paper waste sludge in the building construction industry"*, Resources, Conservation and Recycling. Vol. 32, n.º 2, p. 105-113.

Ahmaruzzaman, M. (2010). *"A review on the utilization of fly ash"*, Progress in Energy and Combustion Science. Vol. 36, n.º 3, p. 327-363.

Almeida, H. C.; Ernani, P. R.; Albuquerque, J. A.; Júnior, J. M.; Almeida, D. (2008). *"Influência da adição de um resíduo alcalino na indústria de papel e celulose na lixiviação de cátions em um solo ácido"*, Revista Brasileira, Ciência do Solo. Vol. 32, p. 1775-1784.

Azevedo, R. T. (2003). *"Gestão e Valorização de lamas de ETAR"*, Disponível em: <<http://natura.link.sapo.pt/Natureza-e-Ambiente/Gestao-Ambiental/content/Gestao-e-valorizacao-de-lamas-de-ETAR?bl=1&viewall=true>>, [Consult. 21/10/2012].

Bessa, E. M. M. P. (2008). *"Implementação de Ecopontos Florestais "*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Universidade de Aveiro.

Bhattacharjee, U.; Kandpal, T. C. (2002). *"Potential of fly ash utilisation in India"*, Energy. Vol. 27, n.º 2, p. 151-166.

Branco, F.; Pereira, P.; Santos, L. P. (2008). *"Pavimentos Rodoviários"*: Almedina ISBN 978-972-40-2684-0.

Carvalho, A. L. (2006). *"Avaliação das propriedades mecânicas da argamassa com adição de resíduo de carbonato de cálcio gerado na fabricação de celulose"*. Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental Urbana, Universidade Federal da Bahia.

Castelo-Branco, F. (1996). *"Estudo da Influência de uma Contaminação no Comportamento Mecânico de um Agregado Calcário de Granulometria Extensa."*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de Mecânica de Solos e Rochas, Universidade de Coimbra.

Caux, L. S. (2006). "*Análise da Viabilidade técnica da utilização de resíduos da indústria de celulose Kraft na produção de corpos cerâmicos*". Monografia para conclusão da Licenciatura em Engenharia de Materiais, Coronel Fabriciano, Minas Gerais.

CELPA (2012a). "*Boletim Estatístico 2012 - Indústria Papeleira Portuguesa*", Disponível em: <<http://www.celipa.pt/Default.aspx?PageId=207&ContentId=87&ChannelId=112>>, [Consult. 13/07/2013].

CELPA (2012b). "*CELPA - Associação da Indústria Papeleira*", Disponível em: <<http://www.celipa.pt/>>, [Consult. 13/07/2013].

CETESB (2008). "*Guia Técnico Ambiental da Indústria de Papel e Celulose*", Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/tecnologia/producao_limpa/documentos/papel.pdf>, [Consult. 15/11/2012].

CNSFARNELL (2004). "*Ultrasonic Pulse Velocity Testing - Technical Reference Manual*": CNS Farnell Limited.

Coelho, A. M. (2010). "*Gestão de cinzas produzidas em centrais de cogeração operadas com biomassa*". Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Universidade de Aveiro.

Dias, D. A. C. M. (2011). "*Estudo da Valorização de Cinzas de Biomassa na Produção de Materiais para a Construção de Recifes Artificiais*". Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Energia e Bioenergia, Universidade Nova de Lisboa.

Dias, V. (2012). "*Aplicação de Resíduos Sólidos em Pavimentos Rodoviários*". Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.

EDP (2004). "*Visita ao Centro de Produção de Setúbal*", Disponível em: <http://www.cienciaviva.pt/veraocv/engenharia/eng2004/index.asp?acao=showactiventidade&id_actividade=5&id_entidade=179>, [Consult. 16/10/2012].

Energia, P. (2010). "*Vantagens e Desvantagens da Energia Biomassa*", Disponível em: <<http://www.portal-energia.com/vantagens-e-desvantagens-da-energia-biomassa/>>, [Consult. 5/10/2012].

EPA (1998). *"How Wastewater Treatment WORKS... The Basics"*, Disponível em: <<http://www.epa.gov/npdes/pubs/bastre.pdf>>, [Consult. 08/10/2012].

Eroglu, H.; Uçüncü, H. H. A.; Imamoglu, O. (2007). *"The effect of fry sludge addition supplied from pulp mill on the compressive strength of cement"*, Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy 42 (2). p. 169-174.

Estradas de Portugal, S. A., (2009). *"14.01 - Terraplenagem, Características dos Materiais"*, Caderno de Encargos Tipo Obra.

Farnell, C. (2004). *"Ultrasonic Pulse Velocity Testing - Technical Reference Manual"*.

Fernandes, M. M. (2006). *"Mecânica dos Solos - Conceitos e Princípios Fundamentais"*: Feup. ISBN 97275208639789727520862.

Fonseca, P. (2002). *"Reciclagem de pavimentos rodoviários: 6ª Semana das Engenharias"*, Disponível em: <<http://recipav.pt/imagens/reciclagem.pdf>>, [Consult. 14/10/2012].

Gao, P.; Lu, X.; Lin, H.; Li, X.; Hou, J. (2007). *"Effects of fly ash on the properties of environmentally friendly dam concrete"*, Fuel, 861. p. 208-211.

Garcia, M. L.; Coutinho, J. S. (2009). *"Grits and dregs for cement replacement- Preliminary studies"*, Proceedings of the 11th International Conference on non-conventional Materials and Technologies (NOCMAT 2009).

Gulyurtlu, I. (2007). *"Estado da arte da gasificação e combustão de biomassa"*, Seminário - Culturas energéticas, biomassa e biocombustíveis, Universidade de Évora.

Hester, R., E (1995). *"Waste treatment and disposal - Issues in Environmental Science and Technology"*: The Royal Society of , Thomas Graham House, Science Park, Cambridge CB4 4WF. ISBN 0-85404-210-5.

Huang, Y.; Bird, R. N.; Heidrich, O. (2007). *"A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements"*, Vol. 52, n.º Resources, Conservation and Recycling. ISSN 0921-3449., p. 58-73.

Jackson, N. M.; Schultz, S.; Sander, P.; Schopp, L. (2009). *"Beneficial use of CFB ash in pavement construction applications"*, Fuel. ISSN 0016-2361. Vol. 88, p. 1210-1215.

Joshi, R. C.; Lothia, R. P. (1997). *"Fly ash in concrete: production, properties and uses"*: Advances in concrete technology, vol. 2, Gordon and Breach Science Publishers.

Júnior, W. S. S. (2010). *"Estudo para a utilização de resíduo da fábrica de papel na construção rodoviária."*. Dissertação para obtenção de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo.

Lingling, X.; Wei, G.; Tao, W.; Nanru, Y. (2005). *"Study on fired bricks with replacing clay by fly ash in high volume ratio"*, Constr Build Mater. Vol. 19, p. 243-247.

Loo, S. V.; Koppejan, J. (2008). *"The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing"*: Earthscan Publications Ltd. ISBN 978-1-84407-249-1.

Martins, F. M. (2006). *"Caracterização química e mineralógica de resíduos sólidos industriais do estado do Paraná"*. Dissertação para obtenção de grau de mestre em Química, curso de Pós graduação em Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

Martins, M. R. R. C. (2007). *"Deslenhificação electroquímica de pasta Kraft, usando polioxometalato como intermediário"*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química. Universidade de Aveiro.

Maslehuddim, M. (1989). *"Effect of sand replacement on the early-age strength gain and long-term corrosion-resisting characteristics of fly ash concrete"*, Vol. 86, p. 58-62.

Matias, D. V. S. (2012). *"Análise do potencial de valorização dos resíduos de Licor Verde da Indústria de Pasta de Papel"*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Modolo, R. (2006). *"Valorização de resíduos do sector de pasta e papel em produtos da construção civil"*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Gestão Ambiental, Materiais e Valorização de Resíduos, Universidade de Aveiro.

Modolo, R.; Benta, A.; Ferreira, V. M.; Machado, L. M. (2009). *"Pulp and paper plants wastes valorization in bituminous mixes"*, Waste Management. Vol. 30, n.º 4, p. 685-696.

Modolo, R.; Dias, V. D.; Ferreira, V. M.; Tarelho, L. A.; Labrincha, J. A. (2012). *"Waste management solutions in construction materials for bottom ash from biomass combustion"*, Cincos`12.

Modolo, R.; Labrincha, J. A.; Ferreira, V. M.; Machado, L. M. (2007). *"Use of cellulose sludge in the production of fibrocement building materials"*.

Modolo, R.; Machado, L. M.; Benta, A.; Labrincha, J. A.; Ferreira, V. M. (2008). *"Solutions development for pulp and paper process solid wastes – from laboratory bench to industrial scale implementation"*, Cincos'08.

Modolo, R.; Senff, L.; Ferreira, V. M.; Labrincha, J. A.; Tarelho, L. A. (2011). *"Use of lime-mud from pulp mill plant in cement-mortars"*, *Wastes: Solutions, Treatments and Opportunities*.

Modolo, R. C. E.; Tarelho, L. A. C.; Teixeira, E. R.; Ferreira, V. M.; Labrincha, J. A. (2014). *"Treatment and use of bottom bed waste in biomass fluidized bed combustors"*, *Fuel Processing Technology*. Vol. 125, p. 170–181.

Molina, C. E. C.; Parreira, A. B.; Júnior, J. L. F. (2004). *"Comportamento mecânico de misturas de resíduos da fabricação de papel e solo para utilização na construção rodoviária"*, XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Mortágua (2007). *"Central Termoeléctrica de Mortágua"*, Disponível em: <<http://fernvicentemarques.blogspot.pt/2007/10/projecto-pioneiro-em-portugal.html>>, [Consult. 6/11/2012].

Mukherjee, A. B.; Zevenhoven, R.; Bhattacharya, P.; Sajwan, K. S.; Kikuchi, R. (2008). *"Mercury flow via coal and coal utilization by-products: A global perspective"*, *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 52, n.º 4, p. 571-591.

Pels, J. R.; Nie, D. S. d.; Kiel, J. H. A. (2005). *"Utilization of ashes from biomass combustion and dasification"*, 14th European Biomass Conference & Exhibition. Paris, France.

Pinto, S. J. F. (2005). *"Valorização de resíduos da indústria da celulose na produção de agregados leves"*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Gestão Ambiental, Materiais e Valorização de Resíduos, Universidade de Aveiro.

Pires, A. F. F. E. (2009). *"Contribuição para o estudo de avaliação do desempenho de um sistema de estabilização anaeróbia e utilização do gás produzido"*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Universidade Nova de Lisboa.

Portucel/Soporcel (2012). *"Fábrica de Cacia - Apresentação à visita da Universidade de Aveiro"*.

Reis-de-Barros, J.; Lopes, M. G.; Correia, A. G. (2002). *"Estudo da utilização de escórias de R.S.U. na construção de pavimentos: Conferência científica e tecnológica em engenharia"*.

Reis-de-Barros, J.; Lopes, M. G.; Correia, A. G. (2006). *"Escórias de R.S.U.: Caracterização mecânica para fins rodoviários: 10º Congresso Nacional de Geotecnia"*.

Ribeiro, A. P. (2010). *"Avaliação do uso de resíduos sólidos inorgânicos da produção de celulose em materiais cerâmicos"*, Escola politécnica da Universidade de São Paulo.

Silva, C. (2009). *"Estudo do agregado reciclado de construção civil em misturas betuminosas para vias urbanas"*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto.

Silva, N. I. W.; Calarge, L. M.; Chies, F.; Mallmann, J. E.; Zwonok, O. (1999). *"Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico"*, Vol. 45, p. 184-187.

Sousa, P. M. L. P. d. (2011). *"Limite de liquidez - Correlações e comparações entre os métodos de Fall Cone e da Concha de Casagrande"*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica (Geotecnia), Universidade Nova de Lisboa.

Tarelho, L. A. C.; Teixeira, E. R.; Silva, D. F. R.; Modolo, R. C. E. (2012). *"Treatment by leaching of bottom bed ash from biomass combustion in bubbling fluidized bed, Proceedings of Ash utilisation"*, Stockholm, Sweden, Jan 25-27.

Thompson, G. S., J.; Kay, M.; Forster, C. (2001). *"The treatment of pulp and paper mill effluent: a review."*, Bioresource Technology J. Vol. 77, p. 275-286.

Virtuoso, J. C. (2004). *"Desenvolvimento, Gestão Ambiental e Sustentabilidade: Compreendendo o Novo Paradigma"*, Disponível em: <http://www.espacoacademico.com.br/038/38cvirtuoso.htm>, [Consult. 23/11/2012].

Whittaker, M.; Taylor, R.; Li, Q.; Li, S.; Black, L. (s.d.). *"The Effects of Bottom Ash as a Partial Cement Replacement"*.

Wildbacher, N. (2007). *"Project "Biomass Energy for Heating and Hot Water Supply in Belarus" - Fact sheet ash utilisation"*, Bios Bioenergiesysteme GmbH, Austria.

Wolff, E. (2008). *"O uso do logo de estação de Tratamento de água e resíduos da Indústria de celulose (dregs, grits e lama de cal) na produção de cerâmica Vermelha."*. Tese para obtenção do grau de Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.